

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Taís Bisognin Garlet

**DIAGNÓSTICO DA COMPETITIVIDADE DA CADEIA  
DE VALOR DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE  
ENERGIA FOTOVOLTAICA**

Porto Alegre

2021

Taís Bisognin Garlet

**DIAGNÓSTICO DA COMPETITIVIDADE DA CADEIA DE VALOR  
DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientador: José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Coorientador: Julio Cezar Mairesse Siluk, Dr.

Porto Alegre

2021

Taís Bisognin Garlet

**DIAGNÓSTICO DA COMPETITIVIDADE DA CADEIA DE VALOR DA GERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutora em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador, Coorientador e Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.**

Orientador PPGEP/UFRGS

---

**Prof. Julio Cezar Mairesse Siluk, Dr.**

Coorientador PPGEP/UFSM

---

**Prof. Alejandro Germán Frank, Dr.**

Coordenador PPGEP/UFRGS

**Banca Examinadora:**

Janine Fleith de Medeiros, Dra. (Universidade de Passo Fundo - UPF)

Leandro Michels, Dr. (Universidade Federal de Santa Maria - UFSM)

Marcia Elisa Soares Echeveste, Dra. (Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS)

*Aos meus pais, Tanea e Valdir, e ao meu irmão, Bruno, por serem pilares fundamentais em  
minha vida, acreditarem em meu potencial e me guiarem na busca por meus sonhos.*

*Ao meu companheiro Fernando, por me apoiar incondicionalmente e me dar forças para  
alçar voos mais altos.*

*“Here comes the sun...”*

*George Harrison*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, saúde e por sempre iluminar meus passos.

Aos meus pais, Tanea e Valdir, e ao meu irmão, Bruno, por estarem ao meu lado e serem o meu porto seguro. Agradeço a compreensão, amor, incentivo e por sempre me proporcionarem oportunidades de estudo e crescimento.

Ao meu companheiro, amigo e colega, Fernando, por sempre acreditar em minha capacidade e me incentivar a conquistar meus sonhos. Sou grata por me auxiliar no desenvolvimento desta tese e por caminhar junto a mim, compartilhando alegrias, desafios e conquistas.

Aos meus avós, pelo apoio e por acreditarem que o estudo leva a grandes sucessos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Luis Duarte Ribeiro, pela confiança, incentivo e compreensão. É uma grande honra ter sido orientada por um professor dedicado, competente, humilde e sempre disposto a ajudar no crescimento de todos. Certamente, é um profissional que me inspira a ser uma pesquisadora melhor a cada dia.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Julio Cezar Mairesse Siluk, pela confiança e por contribuir com a minha formação desde o mestrado. É um exemplo de liderança e um grande motivador para o desenvolvimento de estudos que impactem positivamente a sociedade.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela estrutura oferecida e por oportunizar o desenvolvimento deste estudo.

Aos excelentes professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFRGS pelos ensinamentos e por contribuírem para a conquista deste título.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos e suporte para condução desta pesquisa.

Aos colegas do Núcleo de Inovação e Sustentabilidade (NIS) e do Núcleo de Inovação e Competitividade (NIC), pelas trocas de conhecimento, companheirismo e apoio ao longo do período de doutorado.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões para enriquecimento do trabalho.

Aos profissionais que se disponibilizaram a participar desta pesquisa.

A todas as pessoas que fazem parte da minha vida, que dividiram momentos de preocupação e felicidade e que, de alguma forma, contribuíram para a formação do meu caráter.

## RESUMO

As evoluções tecnológicas e econômicas observadas nas últimas décadas conduzem as pessoas a aumentarem o consumo de eletricidade para sustentarem um ambiente com melhor qualidade de vida. A fim de atender à demanda crescente de energia elétrica com o menor impacto ambiental possível, a integração de energias renováveis na rede de distribuição tem sido consolidada nos últimos anos, com um aumento expressivo na geração distribuída de energia fotovoltaica (FV). Embora essa fonte renovável esteja se desenvolvendo e apresente perspectiva de crescimento, existem dificuldades de naturezas técnica, econômica, social, gerencial e política que podem limitar sua difusão e competitividade. Assim, é importante analisar a cadeia de valor do setor para explorar a condição dos seus elos, identificar ações que podem contribuir para a melhoria da competitividade da indústria fotovoltaica brasileira perante o mercado global. Em virtude disso, esta tese realiza um diagnóstico da competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil. O estudo está baseado em uma abordagem de pesquisa qualitativa, utilizando pesquisas bibliográfica e de campo para compreender e explicar as relações existentes entre as fontes de vantagem competitiva e os elos da cadeia de valor fotovoltaica. Os principais resultados obtidos envolvem: (i) compreensão do panorama nacional da geração distribuída de energia fotovoltaica e das barreiras que comprometem sua maior adoção e difusão; (ii) construção da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e análise dos principais fatores que influenciam a competitividade do setor; e (iii) diagnóstico da competitividade da cadeia de valor fotovoltaica brasileira. Sob a perspectiva acadêmica e a partir de uma análise global, esta tese expande os conhecimentos sobre o mercado de geração distribuída fotovoltaica no Brasil, que até então não havia sido analisado de forma abrangente na literatura. Do ponto de vista prático, a pesquisa contribui para fortalecer a cadeia de valor fotovoltaica brasileira através de informações precisas e detalhadas sobre o segmento e da proposição de estratégias que possibilitam elevar a competitividade do setor e superar os aumentos da tarifa de eletricidade e a crise hídrica nacional. As estratégias propostas podem permitir ganhos econômicos aos diferentes atores ao identificar oportunidades para a transição energética no país e meios para apoiar o processo de tomada de decisão e superar deficiências que afetam a competitividade e crescimento do setor fotovoltaico.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica. Geração distribuída. Cadeia de valor. Competitividade.

## ABSTRACT

Technological and economic evolutions observed in recent decades have led people to increase electricity consumption to support an environment with a better quality of life. The integration of renewable energies in the distribution network has been consolidated in recent years, with an expressive increase in the distributed generation of photovoltaic (PV) energy to meet the growing demand for electricity with the least possible environmental impact. Although this renewable source is developing and has a growth perspective, technical, economic, social, managerial, and political difficulties can limit its diffusion and competitiveness. Thus, it is important to analyze the sector's value chain to explore the condition of its links and identify actions that can improve the competitiveness of the Brazilian photovoltaic industry in the global market. As a result, this thesis diagnoses the competitiveness of the value chain of distributed generation of photovoltaic energy in Brazil. The study is based on a qualitative research approach, using bibliographic and field research to understand and explain the relationships between the sources of competitive advantage and the links in the photovoltaic value chain. The main results obtained involve: (i) understanding of the national panorama of distributed generation of photovoltaic energy and the barriers that compromise its greater adoption and diffusion; (ii) construction of the value chain for distributed photovoltaic energy generation and analysis of the main factors influencing the sector's competitiveness; and (iii) diagnosis of the competitiveness of the Brazilian photovoltaic value chain. From an academic perspective and a global analysis, this thesis expands the knowledge about the photovoltaic distributed generation market in Brazil, which had not been comprehensively analyzed in the literature until then. From a practical point of view, the research contributes to strengthening the Brazilian photovoltaic value chain through accurate and detailed information about the segment and the proposal of strategies that enable to raise the sector's competitiveness and overcome electricity tariff increases and the national water crisis. The proposed strategies can allow economic gains to different actors by identifying opportunities for the energy transition in the country and means to support the decision-making process and overcome deficiencies that affect the competitiveness and growth of the photovoltaic sector.

Keywords: Photovoltaic energy. Distributed generation. Value chain. Competitiveness.

## LISTA DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1 - Estrutura do desenvolvimento da pesquisa.....  | 22  |
| Figura 2 - Caracterização dos artigos propostos.....  | 23  |
| Figura 3 - Estatísticas socioeconômicas da região sul do Brasil.....  | 36  |
| Figura 4 - Etapas metodológicas .....   | 39  |
| Figura 5 - Estrutura para análise dos dados.....  | 42  |
| Figura 6 - Evolução da participação da geração distribuída de energia fotovoltaica na matriz elétrica da região sul do Brasil ..... | 49  |
| Figura 7 - Cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica .....   | 85  |
| Figura 8 - Fatores que influenciam a competitividade e a adoção da energia fotovoltaica.....  | 98  |
| Figura 9 - Estrutura metodológica da pesquisa .....   | 141 |
| Figura 10 - Competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil.....                        | 146 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 - Perfil dos entrevistados .....   | 43  |
| Tabela 2 - Barreiras à adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica e medidas para superá-las.....                           | 59  |
| Tabela 3 - Protocolo da revisão sistemática .....   | 82  |
| Tabela 4 - Elos <i>upstream</i> da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica..                                   | 86  |
| Tabela 5 - Elos <i>midstream</i> da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica                                    | 89  |
| Tabela 6 - Elos <i>downstream</i> da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica .....                             | 92  |
| Tabela 7 - Elos da cadeia de valor auxiliar da geração distribuída de energia fotovoltaica.....                                       | 95  |
| Tabela 8 – Perfis dos validadores .....   | 143 |
| Tabela 9 - Caracterização da amostra.....   | 144 |
| Tabela 10 - Lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para Célula fotovoltaica .....                                      | 148 |
| Tabela 11 - Lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para Produção da parte estrutural do módulo fotovoltaico .....      | 151 |
| Tabela 12 - Lacuna de competitividade e estratégias recomendadas para Produção do módulo fotovoltaico.....                            | 152 |
| Tabela 13 - Lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para Balanceamento do sistema fotovoltaico.....                     | 156 |
| Tabela 14 - Lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para Integração, operação e manutenção do sistema fotovoltaico..... | 157 |
| Tabela 15 - Lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para Desativação do sistema fotovoltaico.....                       | 158 |

## LISTA DE ABREVIACÕES

- ABGD: Associação Brasileira de Geração Distribuída
- ABINEE: Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
- ABSOLAR: Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
- AHP: *Analytic Hierarchy Process*
- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
- BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- CREA: Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
- EPE: Empresa de Pesquisa Energética
- FIERGS: Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul
- FIESC: Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina
- ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
- II: Imposto de Importação
- FIT: *Feed-In Tariff*
- FV: Fotovoltaico
- GD: Geração Distribuída
- LCD: Display de Cristal Líquido
- MW: MegaWatt
- REN: Resolução Normativa
- P&D: Pesquisa e Desenvolvimento
- PIB: Produto Interno Bruto
- PRISMA: *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyzes*
- SEBRAE: Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
- SIN: Sistema Interligado Nacional
- TOPSIS: *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*
- TUSD: Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
- WEEE: Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>14</b> |
| 1.1 Tema e objetivos .....   | 16        |
| 1.2 Justificativa .....  | 17        |
| 1.3 Delineamento do estudo.....  | 20        |
| 1.3.1 Método de pesquisa.....  | 20        |
| 1.4 Delimitações do estudo .....   | 25        |
| 1.5 Estrutura da tese .....  | 27        |
| Referências .....  | 27        |
| <b>2 ARTIGO 1 - Caminhos e barreiras à difusão de geração distribuída de energia fotovoltaica no sul do Brasil.....</b>  | <b>31</b> |
| 2.1 Introdução .....   | 33        |
| 2.2 Determinantes da difusão da energia fotovoltaica .....   | 37        |
| 2.3 Método .....   | 39        |
| 2.3.1 Contextualização da pesquisa.....  | 40        |
| 2.3.2 Coleta dos dados.....  | 41        |
| 2.3.3 Descrição e análise dos resultados .....   | 42        |
| 2.4 Descrição e análise dos resultados .....   | 43        |
| 2.4.1 Descrição dos resultados .....   | 44        |
| 2.4.2 Análise dos resultados .....   | 48        |
| 2.5 Conclusões .....   | 61        |
| Agradecimentos .....   | 63        |
| Referências .....  | 63        |
| Apêndice A.1 – Questionário para associações e empreendedores no setor de geração distribuída de energia fotovoltaica na região sul do Brasil .....                        | 72        |
| Apêndice A.2 – Questionário para concessionárias e cooperativas de geração e distribuição de energia elétrica da região sul do Brasil .....                                | 73        |
| Apêndice A.3 – Questionário para cliente que instalou sistema de energia fotovoltaica na região sul do Brasil .....  | 74        |
| Apêndice A.4 – Questionário para membro do governo da região sul do Brasil .....   | 75        |
| Apêndice A.5 – Questionário para fornecedor de sistemas fotovoltaicos, pesquisador acadêmico e consultor estratégico de energia fotovoltaica na região sul do Brasil ..... | 76        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>3 ARTIGO 2 - Cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e fatores para sua competitividade: uma revisão sistemática .....</b> | <b>77</b>  |
| 3.1 Introdução .....   | 78         |
| 3.2 Método .....   | 80         |
| 3.2.1 Questões de pesquisa, bases de dados e termos de busca.....  | 80         |
| 3.2.2 Pesquisa nas bases de dados e seleção preliminar .....   | 81         |
| 3.2.3 Avaliação de conteúdo .....  | 83         |
| 3.2.4 Extração dos dados e síntese dos resultados.....   | 83         |
| 3.3 Resultados e discussão .....   | 83         |
| 3.3.1 Cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica .....   | 84         |
| 3.3.2 Fatores que influenciam a competitividade e a adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica .....                                      | 97         |
| 3.4 Conclusões .....   | 119        |
| Agradecimentos .....   | 121        |
| Referências .....  | 122        |
| <b>4 ARTIGO 3 – Competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil.....</b>                                 | <b>134</b> |
| 4.1 Introdução .....   | 135        |
| 4.2 Cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica.....  | 138        |
| 4.3 Método .....   | 140        |
| 4.3.1 Revisão narrativa da literatura e análise documental .....   | 141        |
| 4.3.2 Coleta de dados.....   | 142        |
| 4.3.3 Análise dos resultados .....   | 144        |
| 4.4 Resultados e discussão .....   | 145        |
| 4.4.1 Célula fotovoltaica.....   | 147        |
| 4.4.2 Produção da parte estrutural do módulo fotovoltaico.....   | 148        |
| 4.4.3 Produção do módulo fotovoltaico .....  | 151        |
| 4.4.4 Balanceamento do sistema fotovoltaico .....  | 152        |
| 4.4.5 Integração, operação e manutenção do sistema fotovoltaico .....  | 156        |
| 4.4.6 Desativação do sistema fotovoltaico .....  | 157        |
| 4.4.7 Cadeia de valor auxiliar.....  | 159        |
| 4.5 Conclusões .....   | 162        |
| Agradecimentos .....   | 164        |

|   |            |
|---|------------|
| Referências .....   | 164        |
| Apêndice A.1 – Questionário para profissionais envolvidos na cadeia de valor principal da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil ..... | 174        |
| Apêndice A.2 – Questionário para profissionais envolvidos na cadeia de valor auxiliar da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil .....  | 175        |
| <b>5 CONCLUSÕES.....</b>  | <b>176</b> |
| 5.1 Contribuições acadêmicas.....   | 178        |
| 5.2 Contribuições práticas.....   | 180        |
| 5.3 Limitações e oportunidades para futuras pesquisas .....   | 181        |
| Referências .....   | 182        |

## 1 INTRODUÇÃO

As evoluções tecnológicas e econômicas decorrentes da globalização em diversos setores levam as pessoas a consumirem mais eletricidade para sustentarem um ambiente com melhor qualidade de vida (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017). Carstens e Cunha (2019) apontam que a demanda por energia elétrica tende a crescer fortemente em todo o mundo. No Brasil, a expectativa é de que em 2030 seja necessária uma quantidade triplicada de eletricidade, devido ao crescimento demográfico, aumento do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e envelhecimento populacional, contribuindo para uma maior demanda de eletricidade per capita. No entanto, a crescente demanda de energia elétrica desempenha um papel fundamental na busca por novas fontes energéticas que possam atender ao aumento de consumo de forma sustentável. Desse modo, a integração de fontes de energia alternativas ou renováveis tem sido consolidada nos campos político, industrial e comunitário nos últimos anos, com um aumento importante na geração de energia elétrica por tecnologias solares fotovoltaicas (FV) (CARSTENS; CUNHA, 2019; RODRÍGUEZ-URREGO; RODRÍGUEZ-URREGO, 2018).

O uso da energia solar oferece diversos benefícios a longo prazo para o Brasil, pois possibilita o desenvolvimento de regiões onde o custo da eletricidade provinda da rede convencional se torna muito alto em relação ao retorno financeiro do investimento (FERREIRA et al., 2018). Nesse sentido, as possibilidades de uso da tecnologia fotovoltaica são plurais a médio e longo prazos, englobando grandes usinas de geração centralizada e pequenos sistemas FV conectados à rede, consolidando o modelo de geração distribuída (GD) (REDISKE et al., 2018). A geração distribuída a partir de sistemas de energia renovável surgiu de negociações e debates sobre a implementação de iniciativas de mitigação de emissões de carbono e desempenha papel importante no cumprimento de objetivos de políticas energéticas para redução de impactos ambientais (DESCATEAUX; ASTUDILLO; AMOR, 2016).

A geração distribuída de energia fotovoltaica é caracterizada pela instalação de sistemas FV com o objetivo de autoconsumo, localizados próximos às cargas (SILVA et al., 2019). Os sistemas FV são uma tecnologia modular, o que permite a instalação de acordo com a demanda, disponibilidade de espaço e recursos financeiros. Ademais, não emitem poluentes e podem ser instalados em setores residenciais ou comerciais sem aumentar os problemas ambientais existentes nos grandes centros urbanos (TOLEDO; OLIVEIRA FILHO; DINIZ, 2010). Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição têm grande potencial para

auxiliar na diversificação da matriz elétrica, principalmente no Brasil, tendo em vista as condições naturais favoráveis (DE FARIA JR.; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017). Ainda, os sistemas de geração de energia fotovoltaica vinculados à rede de distribuição crescem no país por meio do modelo de compensação de créditos estabelecido pela Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em que o prosumidor gera eletricidade, injeta a energia gerada na rede e subtrai a energia total consumida pelo total gerado (ANEEL, 2012; ROSA et al., 2020).

Garlet et al. (2019) argumentam que há uma grande expectativa com relação ao aumento da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil, especialmente para superar os consecutivos aumentos da tarifa de eletricidade e a escassez hídrica nacional. No entanto, apesar de os consumidores brasileiros demonstrarem interesse crescente em sistemas fotovoltaicos, é possível notar que a adoção da tecnologia ainda não é suficientemente intensa para utilizar todo o potencial de geração existente no país. Esse fato pode estar relacionado a dificuldades na compreensão das necessidades dos clientes e das fontes de vantagem competitiva da geração FV por parte de empresas e *stakeholders* do setor (OLIVEIRA NETO et al., 2017). Dessa forma, devem ser observadas as interações entre os diferentes atores na cadeia de valor, a fim de verificar de que forma criam e transferem conhecimento e fazem negócios para ampliar a adoção e difusão dessa tecnologia (JUNTUNEN; HYYSALO, 2015). Além disso, diversos aspectos devem ser considerados pelos *stakeholders* para que um número crescente de clientes adote a tecnologia fotovoltaica, trazendo ganhos à competitividade e tornando mais atrativo o investimento no setor (SHUAI et al., 2018; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). Destaca-se ainda que, para promover a adoção mais rápida da energia FV, é importante a mobilização de clientes por meio da oferta de produtos acessíveis a um baixo nível de risco financeiro, com baixos custos de processo, baixa demanda de manutenção e baseados em modelos de negócios comprovados (STAUCH; VUICHARD, 2019).

O estudo dos fatores que oferecem vantagem competitiva para os diferentes atores da cadeia de valor está no cerne das questões de economia industrial e gestão estratégica, e sua complexidade é notada principalmente no setor energético, uma vez que depende das características e políticas distintas de cada país (CAMISÓN; FORÉS, 2015). Dessa forma, surgem quatro questões de pesquisa que norteiam a presente tese: (i) Qual é o panorama atual da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil?, (ii) Quais são os principais atores e

atividades da cadeia de valor do setor fotovoltaico?, (iii) Quais são os principais fatores que influenciam a competitividade da cadeia de valor fotovoltaica? e (iv) Como os elos da cadeia de valor fotovoltaica brasileira estão posicionados competitivamente? Nesse contexto, a presente tese visa aprofundar essas questões, ampliando o estado atual do conhecimento sobre a temática e propondo soluções para melhoria da competitividade do setor fotovoltaico brasileiro. Para tanto, assume-se que existem fatores essenciais dentro das dimensões técnica, gerencial, econômica, política e mercadológica que exercem influência sobre a competitividade dos *stakeholders* envolvidos em todos os segmentos da cadeia de valor fotovoltaica. Esses fatores devem ser observados pelos diferentes atores para que garantam posição competitiva e elaborem soluções para atrair um número crescente de consumidores, expandindo o mercado e consolidando a geração distribuída FV na matriz elétrica brasileira.

Esta pesquisa preenche lacunas na literatura através de uma análise global da cadeia de valor brasileira de geração distribuída fotovoltaica, identificando o impacto de estratégias internacionais na competitividade e crescimento do mercado interno. Ademais, amplia os estudos sobre inovação e sustentabilidade e impulsiona a conscientização ambiental dos consumidores e empresas a partir da adoção de práticas de baixo impacto ambiental como a geração fotovoltaica. O estudo fornece ainda contribuições práticas, auxiliando os *stakeholders* na definição de estratégias e medidas corretivas para reduzir riscos e fortalecer o mercado nacional. A tese disponibiliza informações e conhecimentos que possibilitam a realização de campanhas educativas de conscientização sobre a energia fotovoltaica, além de contribuir para o estabelecimento de um mercado sólido, criação de renda e empregos, especialmente importantes para a recuperação econômica nacional.

## 1.1 TEMA E OBJETIVOS

O tema de pesquisa desta tese contempla as áreas de geração distribuída de energia fotovoltaica, cadeia de valor, difusão e adoção de tecnologias de energias renováveis e competitividade. Tendo em vista que a demanda crescente por eletricidade requer novas fontes sustentáveis de energia, a geração distribuída FV é apontada como uma tecnologia de baixo impacto ambiental passível de expansão. Nesse contexto, é importante o desenvolvimento de uma pesquisa que estude esse tipo de geração de energia elétrica, compreendendo a dinâmica

da cadeia de valor do setor fotovoltaico e os aspectos que podem representar vantagens competitivas aos diferentes atores envolvidos.

Considerando os assuntos enunciados, o objetivo geral desta tese é realizar um diagnóstico da competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil. Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) compreender o cenário atual e as tendências futuras do mercado de geração distribuída de energia fotovoltaica e as barreiras que limitam a difusão desta tecnologia e sua competitividade;
- b) identificar as atividades e atores que compõem a cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e os fatores que influenciam sua competitividade e adoção;
- c) realizar um diagnóstico da posição competitiva dos elos da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil, propondo soluções para garantia de vantagem competitiva e difusão fotovoltaica, considerando os diferentes atores do setor.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Diversos esforços têm sido feitos no cenário mundial para minimizar a geração de eletricidade oriunda de combustíveis fósseis e promover a produção e o uso de energias renováveis (MASTROCINQUE et al., 2020). Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica é apontada como uma das principais fontes de energia na transição da geração de energia elétrica atrelada a recursos não renováveis para a geração baseada em fontes de energia renováveis (DEVABHAKTUNI et al., 2013; KABIR et al., 2018). Tendo em vista que permite a redução de impacto ambiental e emissões de carbono, a tecnologia fotovoltaica apresenta tendência de crescimento, suportada por políticas governamentais de energia sólidas e diminuição dos custos de capital (LEE; SHEPLEY, 2020).

No Brasil, apesar de a matriz elétrica ser predominantemente renovável devido à fonte hidráulica, há necessidade de diversificação das fontes energéticas em decorrência da baixa precipitação durante as estações secas (GUERRA et al., 2015; DE FARIA JR.; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017). Dessa forma, há expectativa de crescimento da geração distribuída de energia FV como uma fonte alternativa, principalmente devido ao estabelecimento de ações regulatórias no país, que permitem a compensação da energia excedente produzida por sistemas

de menor porte. O desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica pode ser observado nos dados de geração distribuída divulgados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e pela ANEEL, que apontam que em 2018 a potência instalada dessa fonte energética era de 562 MW, enquanto em 2021 esse valor atingiu 7,23 GW, representando 97,4% de todas as fontes de geração distribuída do Brasil (ANEEL, 2021; EPE, 2019).

Embora a geração fotovoltaica apresente tendência de crescimento e demonstre grande importância no contexto energético nacional, ainda existem fragilidades que impedem as empresas de competirem satisfatoriamente nos cenários brasileiro e internacional. Desse modo, é necessário integrar de forma harmônica diferentes atores da cadeia de valor para contribuir para a adoção e difusão da geração distribuída de energia FV, apoiados no aumento da competitividade diante de outras fontes geradoras (NAHM; STEINFELD, 2014). Assim, sob a ótica dos elos da cadeia de valor, a compreensão dos fatores que influenciam a posição competitiva da energia FV é essencial e justifica-se pela necessidade de os atores disporem de informações para que elaborem soluções, apoiando o processo de tomada de decisão e determinando o sucesso do mercado fotovoltaico.

Destaca-se que esta pesquisa contribui para ampliar as capacidades competitivas dos *stakeholders* no mercado, proporcionando seu fortalecimento diante dos desafios impostos nas esferas econômica, técnica, gerencial, social, política e mercadológica. Ainda, possibilita aos atores da cadeia de valor ganhos econômicos ao identificar meios para superar deficiências que afetam o crescimento e a competitividade do setor fotovoltaico, além de permitir a parametrização de ações a serem desenvolvidas para ajustar e reforçar a atuação dos diferentes elos no cenário energético. Sendo assim, é fundamental o conhecimento e acompanhamento da competitividade dos atores nos âmbitos empresarial e estrutural para contornar barreiras e ampliar essa fonte geradora de eletricidade.

Na literatura acadêmica, foi possível observar o estudo de Rosa et al. (2020), que visa identificar oportunidades para promover a participação fotovoltaica no Brasil. Para isso, os autores propõem uma modelagem matemática baseada na técnica de *Analytic Hierarchy Process* (AHP) que utiliza 18 indicadores de desempenho capazes de mensurar o nível de competitividade dos municípios da região sul do país para instalação de sistemas FV. Os resultados do estudo explicam os padrões desiguais de difusão da tecnologia na região e propõem ações para disseminar a geração distribuída, bem como para prospecção de clientes pelas integradoras de sistemas FV. Já o estudo de Shuai et al. (2018) investiga a competitividade

internacional dos produtos fotovoltaicos da China, adotando o modelo de participação de mercado constante e o método de vantagem comparativa. Os principais achados revelam tendência ascendente na competitividade dos componentes FV chineses; contudo, a estrutura de *commodities* de suas exportações está se deteriorando e não se encaixa nas atuais tendências da demanda do mercado internacional.

A pesquisa de Zhao, Zhang e Zuo (2011) utiliza uma abordagem de modelo de diamante para identificar e analisar fatores que têm impactos significativos no desenvolvimento do setor de energia fotovoltaica da China. Os fatores incluem condições de demanda, estratégia das empresas, estruturas de apoio, indústria e governo, e afetam a competitividade da indústria FV. Os resultados apontam que os fatores devem ser fortalecidos para crescimento a longo prazo do setor fotovoltaico e demonstram a necessidade de compreender as interações dinâmicas entre os diferentes elementos envolvidos na indústria FV para que sua competitividade seja melhorada. Enquanto isso, o trabalho de He et al. (2017) busca entender as habilidades de desenvolvimento competitivo dos projetos de geração distribuída de energia fotovoltaica na China e mensurá-las de maneira eficaz, utilizando ponderação combinada e *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS). As conclusões indicam que a capacidade instalada, o desenvolvimento da economia local e a quantidade de energia conectada à rede influenciam as competências centrais do projeto fotovoltaico, e outros fatores devem ser analisados para promover vantagens competitivas ao setor.

O trabalho de Zhang e Gallagher (2016) explora como a China se inseriu nos sistemas globais de inovação em energia limpa, examinando o caso da indústria solar fotovoltaica. O artigo decompõe a cadeia de valor industrial fotovoltaica global e determina os principais atores que moldam a transferência e difusão da tecnologia. Já Liu e Lin (2019) buscam explorar o status atual da estrutura da cadeia de valor da indústria FV chinesa, utilizando regressão *stepwise* e análise de componentes principais para identificar os principais fatores que limitam a capacidade geral de valor agregado da cadeia de valor. Os resultados apontam que existem grandes diversidades nos principais fatores de influência da capacidade de valor agregado das empresas fotovoltaicas em diferentes elos, que devem ser incorporadas para que a análise seja mais condizente com a realidade.

Conforme é possível observar nas pesquisas citadas, existem estudos que abordam de forma isolada estruturas de cadeia de valor fotovoltaica e competitividade do setor. No entanto, a maior parcela dos trabalhos foi conduzida na China, que demonstra uma realidade industrial

consideravelmente distinta da observada no Brasil. Ademais, ao contrário do que apresenta esta tese, os estudos não consideraram todas as atividades e atores que compõem a cadeia de valor da geração distribuída de energia FV e tampouco levantaram de forma detalhada fatores que influenciam a competitividade do setor sob diversas esferas. Destaca-se ainda que os estudos não discutem especificamente o problema investigado por esta pesquisa, pois não apresentam um modelo de diagnóstico de competitividade que auxilie os *stakeholders* a elaborarem estratégias para expansão do mercado fotovoltaico. Entretanto, os trabalhos supracitados se apresentam como pontos de partida para condução deste estudo no contexto brasileiro, que visa inter-relacionar, de maneira singular, as temáticas de geração distribuída FV, cadeia de valor, fatores-chave para a competitividade e diagnóstico competitivo.

### 1.3 DELINEAMENTO DO ESTUDO

Uma vez definidos os objetivos da tese e apresentada a justificativa acerca da relevância deste trabalho, esta seção estabelece o delineamento do estudo a fim de que os objetivos sejam alcançados. O enquadramento metodológico é abordado inicialmente, seguido pelos métodos empregados na condução da pesquisa.

#### 1.3.1 Método de pesquisa

A condução de pesquisas científicas deve estar balizada em pressupostos metodológicos para que possa ser considerada válida e apresentar resultados coerentes (MARCONI; LAKATOS, 2017). Dessa forma, este trabalho enquadra-se, quanto à sua natureza, como pesquisa aplicada, uma vez que objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas pontuais no contexto e no momento da investigação (GIL, 2010). Quanto ao método científico, esse estudo é caracterizado como indutivo, pois, partindo-se de evidências encontradas por uma fração da população estudada, buscam-se aspectos que possam estar presentes em outros indivíduos e infere-se uma verdade geral cujas conclusões apresentam conteúdo mais amplo do que as premissas nas quais se baseiam (MIGUEL, 2011; MARCONI; LAKATOS, 2017).

Em relação à abordagem, esta tese é qualitativa, uma vez que são pesquisadas informações que permitem evidenciar as características e fontes de vantagem competitiva da

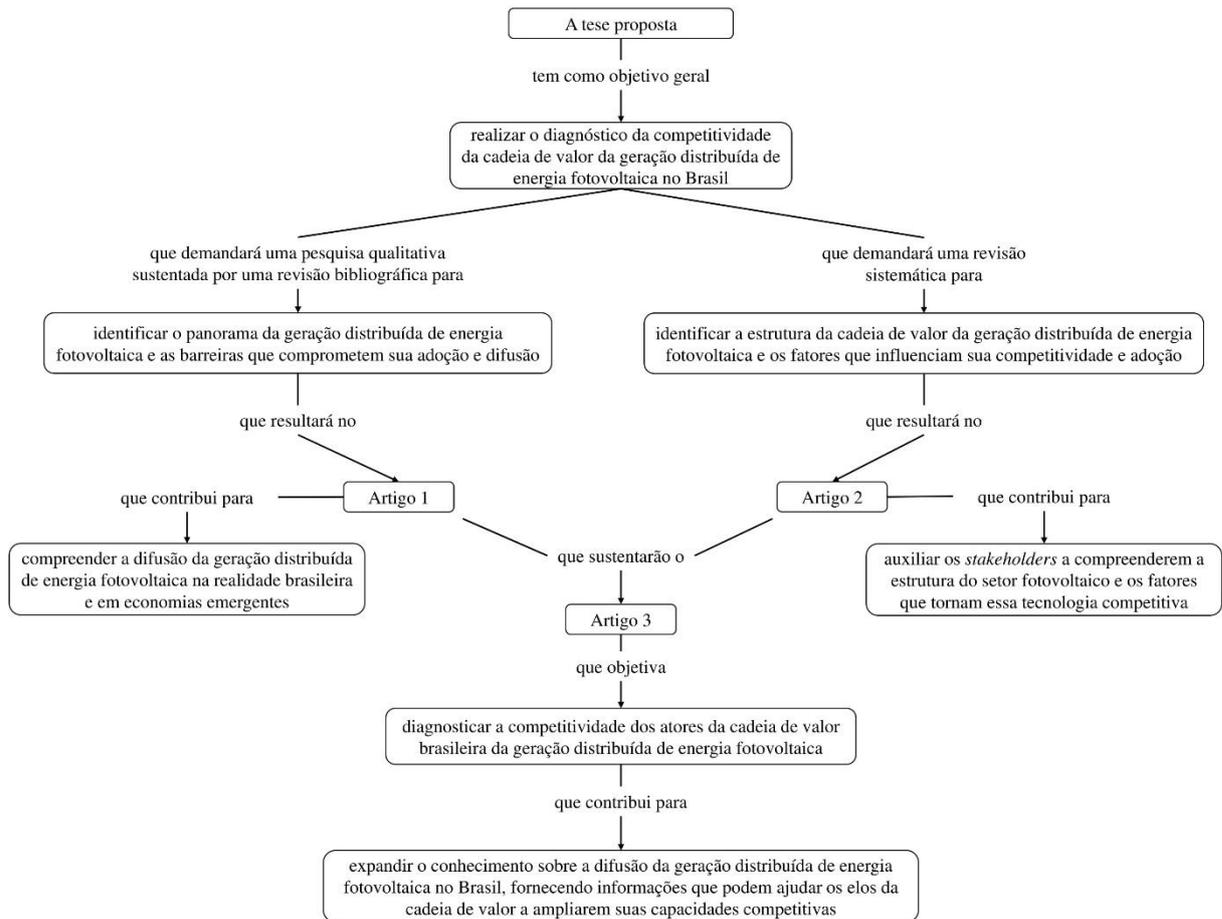
cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica, centrando-se na compreensão e explicação das relações existentes (MARCONI; LAKATOS, 2017). A pesquisa é considerada exploratória e descritiva em relação aos seus objetivos, pois visa compreender com maior profundidade a temática e descrever as características e relações entre diferentes fatores e elos da cadeia de valor da geração distribuída fotovoltaica para diagnosticar sua competitividade.

Este estudo utiliza dois procedimentos técnicos para o pleno cumprimento dos seus objetivos. Por um lado, faz uso da pesquisa bibliográfica, tendo em vista a necessidade de encontrar materiais científicos que embasem as respostas às questões abordadas. Por outro, realiza uma pesquisa de campo, que se caracteriza pela obtenção de informações por meio de coletas de dados junto a profissionais do setor elétrico, clientes, fornecedores, membros do governo, pesquisadores e demais pessoas envolvidas na cadeia de valor fotovoltaica.

### **1.3.2 Método de trabalho**

Para atender aos objetivos propostos, a pesquisa é delineada segundo os conceitos referentes à geração distribuída de energia fotovoltaica alinhados com a caracterização de cadeia de valor e diagnóstico de competitividade. Para tanto, o objetivo geral da tese é contemplado por meio do cumprimento de três etapas, representadas em formato de artigos. Destaca-se que cada artigo apresenta objetivos e métodos de trabalho específicos, necessários para que o objetivo geral da pesquisa seja alcançado. A estrutura proposta para o desenvolvimento do estudo é apresentada na Figura 1, enfatizando que o Artigo 1 concentra-se principalmente na compreensão do setor da geração distribuída de energia fotovoltaica, o Artigo 2 define a cadeia de valor do setor e suas fontes de vantagem competitiva, enquanto o Artigo 3 realiza um diagnóstico da competitividade do mercado fotovoltaico brasileiro.

Figura 1 - Estrutura do desenvolvimento da pesquisa



Conforme é possível observar na estrutura de desenvolvimento da tese, as etapas iniciais envolvem a compreensão e exploração do setor de geração distribuída de energia fotovoltaica, através de dois estudos paralelos que originam os Artigos 1 e 2. O primeiro estudo busca o entendimento do cenário atual e tendências futuras do mercado fotovoltaico, bem como dos fatores limitantes à sua expansão e competitividade. O segundo estudo, por sua vez, define a composição da cadeia de valor do setor e as fontes de vantagem competitiva que possibilitam aos *stakeholders* estabelecerem planos de ação para o crescimento desse mercado de energia renovável. A partir disso, têm-se embasamento e suporte para que o Artigo 3 seja desenvolvido, uma vez que os estudos realizados são fundamentais para identificação de elos da cadeia de valor presentes no Brasil e de suas posições competitivas perante o mercado energético. Sendo assim, é possível apontar os aspectos fundamentais a serem analisados pelos diferentes atores envolvidos nos segmentos *upstream*, *midstream*, *downstream* e auxiliar da cadeia de valor para

que garantam o crescimento da tecnologia fotovoltaica na matriz elétrica do país. A Figura 2 caracteriza e descreve sucintamente a proposta de cada artigo que compõe esta tese.

Figura 2 - Caracterização dos artigos propostos

| Estudos  | Objetivos  | Questões de Pesquisa   | Método de Pesquisa  | Contribuições   |
|----------|--|--|---|---|
| Artigo 1 | Identificar o panorama da geração distribuída de energia fotovoltaica, enfatizando as barreiras que comprometem a maior adoção e difusão desta tecnologia.   | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Quais são as perspectivas futuras da geração distribuída de energia fotovoltaica?</li> <li>•Quais são as barreiras à adoção e difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica?</li> </ul>   | Pesquisa qualitativa:<br>1.Análise da literatura;<br>2.Entrevistas individuais com pessoas envolvidas no setor energético.  | Os resultados permitem compreender a difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica na realidade brasileira e em economias emergentes ou regiões onde a implementação de sistemas fotovoltaicos é incipiente.               |
| Artigo 2 | Identificar os atores e atividades que compõem a cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e os principais fatores que influenciam a competitividade e a adoção desta tecnologia. | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Qual é a estrutura da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica?</li> <li>•Quais são os fatores que influenciam a competitividade e adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica?</li> </ul>                               | Pesquisa teórica qualitativa:<br>1. Revisão sistemática da literatura para estruturar a cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e identificar os fatores que influenciam a competitividade do setor. | Os resultados apresentam uma cadeia de valor exclusiva do setor e fatores que influenciam sua competitividade, auxiliando governo, empresas, concessionárias e clientes a expandirem a tecnologia fotovoltaica.                     |
| Artigo 3 | Realizar o diagnóstico da competitividade dos elos da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica presentes no Brasil.  | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Quais são os elos da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica presentes no Brasil?</li> <li>•Qual é o nível de competitividade de cada elo da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil?</li> </ul> | Pesquisa qualitativa:<br>1.Análise documental e da literatura;<br>2.Entrevistas individuais com diferentes atores da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica.  | Os resultados permitem compreender a posição competitiva dos elos da cadeia de valor fotovoltaica brasileira perante o cenário global e as estratégias para superar as dificuldades e fortalecer a indústria fotovoltaica nacional. |

O Artigo 1 – “Caminhos e barreiras à difusão de geração distribuída de energia fotovoltaica no sul do Brasil” identifica o panorama da geração distribuída de energia fotovoltaica e as barreiras que comprometem sua maior difusão e adoção na região sul do Brasil. Para condução deste estudo qualitativo, inicialmente é observada a literatura existente acerca das tendências futuras da geração de eletricidade pela fonte fotovoltaica e dos fatores que limitam a sua expansão a fim de elaborar os roteiros de entrevistas para os diferentes grupos de respondentes. Desse modo, são realizadas 12 entrevistas com profissionais de concessionárias de distribuição de eletricidade, responsável por associação de empresas do setor fotovoltaico, cliente que instalou sistema fotovoltaico, membro do governo, fornecedor de sistemas fotovoltaicos, pesquisador na área energética e consultor estratégico no setor de energia para verificar suas opiniões sobre a temática.

Os resultados obtidos por meio das entrevistas são contrastados com as informações verificadas na literatura e apontam que essa fonte de energia solar tende a crescer, mas ainda há muito a ser feito para que se consolide na matriz elétrica, dada a existência de barreiras técnicas, econômicas, sociais, gerenciais e políticas. Entre as principais barreiras identificadas estão a baixa qualidade dos sistemas fotovoltaicos, o alto custo do investimento inicial, a dependência de financiamento para a compra de módulos solares, a cultura do consumidor, o desconhecimento sobre a tecnologia fotovoltaica, os ineficientes serviços de pós-venda, a dependência de importações de componentes fotovoltaicos e a falta de políticas para incentivar a geração fotovoltaica. Embora este estudo permita compreender a difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica e apontar as estratégias para superar as barreiras existentes na região sul do Brasil, as conclusões são relevantes e podem ser estendidas para a realidade brasileira, economias emergentes ou regiões onde a implementação de sistemas fotovoltaicos ainda é incipiente, possibilitando tornar essa fonte de energia renovável mais presente a nível mundial.

O Artigo 2 – “Cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e fatores para sua competitividade: uma revisão sistemática” identifica os atores e atividades que compõem a cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e os principais fatores que influenciam a competitividade e a adoção dessa tecnologia. Esta pesquisa teórica qualitativa compila as informações de 94 estudos acerca da temática, através de uma revisão sistemática da literatura conduzida com o auxílio do protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). A cadeia de valor construída é um resultado singular da união de diferentes estruturas existentes e reportadas pela literatura, englobando de maneira detalhada e ampla todos os elos envolvidos nos segmentos *upstream*, *midstream*, *downstream* e cadeia auxiliar. Além disso, os resultados apontam que os diferentes *stakeholders* do setor fotovoltaico devem observar fatores econômicos, gerenciais, técnicos, políticos e mercadológicos para que essa fonte de energia renovável se torne uma opção atrativa e viável para os investidores, constituindo um mercado em expansão. Dessa forma, o estudo auxilia governo, investidores, empresas, concessionárias de distribuição de energia elétrica, pesquisadores e consumidores a compreenderem a estrutura do setor fotovoltaico e os aspectos que devem ser observados e constantemente melhorados para difundir essa tecnologia renovável e contribuir para os desenvolvimentos econômico, ambiental e social.

O Artigo 3 – “Competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil” apresenta um diagnóstico da competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no país. Para condução deste estudo qualitativo, é utilizado o embasamento teórico obtido nos Artigos 1 e 2 e são identificados os elos da cadeia de valor que estão presentes no Brasil através de análises da literatura e documental. Na sequência, os roteiros de entrevistas elaborados são aplicados a 87 profissionais envolvidos em todos os elos da cadeia de valor brasileira a fim de que apontem como estão competitivamente posicionados perante o mercado internacional, quais as principais dificuldades que limitam a competitividade do setor e as estratégias que podem ser adotadas a níveis empresarial, político e mercadológico para desenvolvimento do setor fotovoltaico.

As informações obtidas com os respondentes são contrastadas com documentos, relatórios e artigos reportados na literatura, possibilitando realizar um diagnóstico da competitividade do mercado fotovoltaico com elementos confiáveis e condizentes com a realidade do país. Os resultados apontam que a competitividade da indústria FV brasileira é afetada principalmente por lacunas na produção de módulos FV, compreendendo a fabricação de lingotes e *wafers* de silício grau solar, célula FV, caixa de junção, *backsheet*, filme encapsulante e vidro especial fotovoltaico. Esse cenário está associado aos altos custos de produção no país, à carga tributária elevada e à falta de fiscalização e incentivos para o desenvolvimento da cadeia produtiva. Os achados também revelam a necessidade de estabelecer arranjos colaborativos internacionais para garantir agilidade em processos inovadores e possibilitar que o país obtenha ganhos de competitividade industrial. Ademais, apontam que o Brasil deve intensificar as conexões entre os elos das cadeias de valor principal e auxiliar para acelerar o desenvolvimento do setor fotovoltaico. O diagnóstico abrangente apresentado neste estudo é particularmente útil para que profissionais envolvidos na cadeia de valor FV desenvolvam pesquisas e ações para aumentar a competitividade do setor e a participação da geração FV distribuída na matriz elétrica nacional.

#### 1.4 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

Para o desenvolvimento desta tese, algumas delimitações de pesquisa foram estabelecidas. De acordo com Rediske et al. (2018), há uma gama de possibilidades no uso a médio e longo prazos da energia solar fotovoltaica, desde pequenos sistemas conectados à rede

por meio de geração distribuída até usinas geradoras de energia elétrica de grande escala. Nesse sentido, o presente estudo limita-se a analisar somente a modalidade de geração distribuída, tendo em vista que oferece benefícios ao sistema elétrico, como a diminuição de perdas devido à proximidade entre os locais de geração e consumo e a melhoria da qualidade da energia fornecida, e tem como vantagens a necessidade de pequenos espaços para instalação e a diminuição de investimentos em linhas de transmissão (FERREIRA et al., 2018; RÜTHER; ZILLES, 2011). Além disso, o estudo analisa somente sistemas fotovoltaicos compostos por módulos baseados em *wafers* de silício, que foram responsáveis por cerca de 95% da produção total de módulos em 2019 (MUKISA et al., 2021). Adicionalmente, a tese não investiga soluções de armazenamento da energia fotovoltaica gerada, uma vez que a previsão para sistema FV distribuído com armazenamento ainda não está clara devido aos estágios iniciais desta prática e aos altos custos envolvidos, que no momento podem inviabilizar o investimento (SILVA; BRANCO, 2018).

Destaca-se ainda que o Artigo 1 da tese, que busca compreender os caminhos e barreiras à adoção fotovoltaica, é conduzido na região sul do Brasil, enquanto o diagnóstico da competitividade da cadeia de valor do setor é aplicado a atores de todo o país. Por questões de oportunidade e conveniência, as entrevistas que embasaram o primeiro artigo envolveram atores da região sul. Contudo, entende-se que essa delimitação não compromete o estudo, pois o cenário de difusão da tecnologia observado nesses estados pode ser estendido à realidade brasileira, tendo em vista que todo o setor é regulamentado pela ANEEL e está sujeito às mesmas especificações. Ainda, não são identificadas diferenças significativas no que tange à adoção fotovoltaica sob as dimensões técnica, política, gerencial e econômica entre os estados brasileiros, permitindo que as informações do Artigo 1 sejam generalizadas a nível nacional. Por outro lado, o Artigo 2 contempla uma revisão sistemática que coleta informações internacionais, enquanto o Artigo 3 é baseado em atores sediados em todo o Brasil, uma vez que algumas atividades da cadeia de valor são desenvolvidas em apenas alguns estados e, nesta pesquisa, busca-se contemplar uma ampla variedade de atores envolvidos nos diferentes segmentos do setor.

## 1.5 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está organizada em cinco capítulos principais. O primeiro capítulo compreende a introdução do trabalho, que tem por finalidade contextualizar o problema de pesquisa e apresentar os objetivos geral e específicos, justificando-os sob os pontos de vista acadêmico e prático. Ademais, este capítulo apresenta o delineamento do trabalho, a estrutura e as delimitações do estudo.

O segundo capítulo apresenta o primeiro artigo proposto, que consiste em um estudo qualitativo para identificar o panorama da geração distribuída de energia fotovoltaica na região sul do Brasil, bem como as barreiras técnicas, econômicas, sociais, gerenciais e políticas que limitam a maior adoção e difusão desta tecnologia. Para isso, a literatura existente é observada e entrevistas semiestruturadas são conduzidas com cliente, pesquisador, membro do governo e profissionais do setor elétrico da região.

O terceiro capítulo contempla o segundo artigo da tese, que compreende uma revisão sistemática da literatura seguindo o protocolo PRISMA. Este estudo objetiva identificar os elos que compõem a cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e os principais fatores que influenciam a competitividade e a adoção desta fonte de energia renovável.

O quarto capítulo compreende o terceiro artigo proposto, que tem como foco o diagnóstico da competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil. Este estudo apresenta ainda as dificuldades que limitam a obtenção de maiores níveis de competitividade no setor e as estratégias para fortalecer o mercado e ampliar a adoção fotovoltaica.

O quinto capítulo apresenta as considerações finais da tese, englobando os resultados obtidos sob as perspectivas acadêmica e prática. Além disso, evidencia as limitações do estudo e os direcionamentos para pesquisas futuras.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa ANEEL Nº 482, de 17 de Abril de 2012**. Brasil, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Geração Distribuída**. 2021.

Disponível em:

<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjM4NmM0OWYtN2IwZS00YjViLTllMjltN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 25 out. 2021.

CAMISÓN, C.; FORÉS, B. Is tourism firm competitiveness driven by different internal or external specific factors?: New empirical evidence from Spain. **Tourism Management**, v. 48, p. 477–499, 2015.

CARSTENS, D. D. S.; CUNHA, S. K. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, v. 125, p. 396–404, 2019.

DE FARIA JR., H.; TRIGOSO, F. B. M.; CAVALCANTI, J. A. M. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 469–475, 2017.

DESCATEAUX, P.; ASTUDILLO, M. F.; AMOR, M. B. Assessing the life cycle environmental benefits of renewable distributed generation in a context of carbon taxes: The case of the Northeastern American market. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1178–1189, 2016.

DEVABHAKTUNI, V. et al. Solar energy: Trends and enabling technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 555-564, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional: ano base 2018**. Brasília - DF. 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181–191, 2018.

GARLET, T. B. et al. Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 157-169, 2019.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo - SP: Atlas, 2010.

GUERRA, J. B. S. O. A. et al. Future scenarios and trends in energy generation in Brazil: Supply and demand and mitigation forecasts. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 197–210, 2015.

HE, L. et al. Core Abilities Evaluation Index System Exploration and Empirical Study on

- Distributed PV-Generation Projects. **Energies**, v. 10, n. 12, p. 2083, 2017.
- JUNTUNEN, J. K.; HYYSALO, S. Renewable micro-generation of heat and electricity—Review on common and missing socio-technical configurations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 857–870, 2015.
- KABIR, E. et al. Solar energy: Potential and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 894–900, 2018.
- LEE, J.; SHEPLEY, M. C. Benefits of solar photovoltaic systems for low-income families in social housing of Korea: Renewable energy applications as solutions to energy poverty. **Journal of Building Engineering**, v. 28, p. 101016, 2020.
- LIU, J.; LIN, X. Empirical analysis and strategy suggestions on the value-added capacity of photovoltaic industry value chain in China. **Energy**, v. 180, p. 356–366, 2019.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 8 ed. São Paulo - SP: Atlas, 2017.
- MASTROCINQUE, E. et al. An AHP-based multi-criteria model for sustainable supply chain development in the renewable energy sector. **Expert Systems with Applications**, v. 150, p. 113321, 2020.
- MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Campus, 2011.
- MUKISA, N. et al. Multi criteria analysis ranking of solar photovoltaic modules manufacturing countries by an importing country: A case of Uganda. **Solar Energy**, v. 223, p. 326–345, 2021.
- NAHM, J.; STEINFELD, E. S. Scale-up Nation: China’s Specialization in Innovative Manufacturing. **World Development**, v. 54, p. 288-300, 2014.
- OLIVEIRA NETO, G. C. et al. Framework to overcome barriers in the implementation of cleaner production in small and medium-sized enterprises: Multiple case studies in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 50–62, 2017.
- REDISKE, G. et al. Determinant factors in site selection for photovoltaic projects: A systematic review. **International Journal of Energy Research**, v. 43, n. 5, p. 1689–1701, 2018.
- RODRÍGUEZ-URREGO, D.; RODRÍGUEZ-URREGO, L. Photovoltaic energy in Colombia: Current status, inventory, policies and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 160–170, 2018.
- ROSA, C. B. et al. Mathematical modeling for the measurement of the competitiveness index of Brazil south urban sectors for installation of photovoltaic systems. **Energy Policy**, v. 136, p.

111048, 2020.

RÜTHER, R.; ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1027–1030, 2011.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590–601, 2017.

SHUAI, J. et al. Are China's solar PV products competitive in the context of the Belt and Road Initiative? **Energy Policy**, v. 120, p. 559–568, 2018.

SILVA, G. D. P.; BRANCO, D. A. C. Modelling distributed photovoltaic system with and without battery storage: A case study in Belem, northern Brazil. **Journal of Energy Storage**, v. 17, p. 11-19, 2018.

SILVA, P. P. et al. Photovoltaic distributed generation – An international review on diffusion, support policies, and electricity sector regulatory adaptation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 30-39, 2019.

STAUCH, A.; VUICHARD, P. Community solar as an innovative business model for building-integrated photovoltaics: An experimental analysis with Swiss electricity consumers. **Energy and Buildings**, v. 204, p. 109526, 2019.

TOLEDO, O. M.; OLIVEIRA FILHO, D.; DINIZ, A. S. A. C. Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 506–511, 2010.

ZHANG, F.; GALLAGHER, K. S. Innovation and technology transfer through global value chains: Evidence from China's PV industry. **Energy Policy**, v. 94, p. 191–203, 2016.

ZHAO, Z.-Y.; ZHANG, S.-Y.; ZUO, J. A critical analysis of the photovoltaic power industry in China - From diamond model to gear model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4963–4971, 2011.

## 2 ARTIGO 1 - Caminhos e barreiras à difusão de geração distribuída de energia fotovoltaica no sul do Brasil

Taís Bisognin Garlet

José Luis Duarte Ribeiro

Fernando de Souza Savian

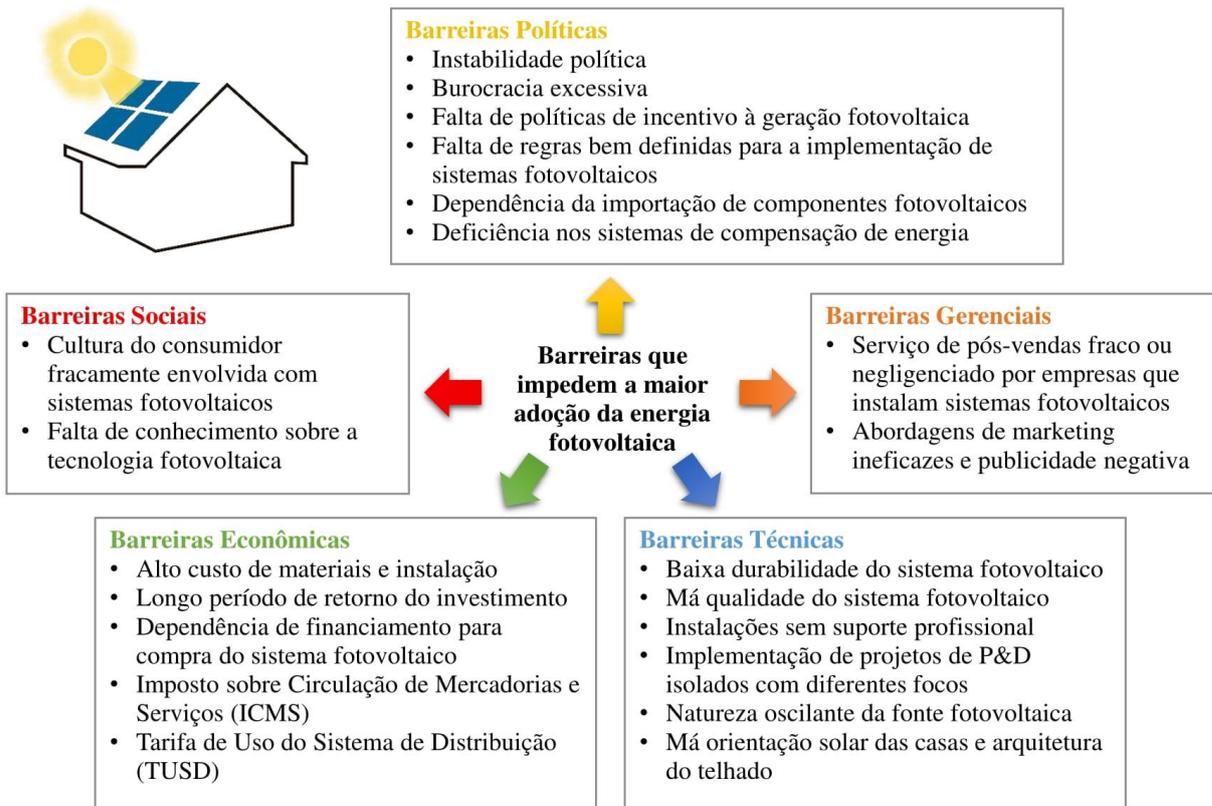
Julio Cezar Mairesse Siluk

Uma versão em inglês similar a este artigo foi publicada em 16/05/2019 no periódico *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Qualis A1; Fator de Impacto JCR 2020: 14.982; Percentil Scopus: 97%).

**Resumo:** A energia fotovoltaica (FV) foi identificada como uma das principais fontes de energia na transição da geração de eletricidade oriunda de fontes não renováveis para fontes renováveis. Na região sul do Brasil, apesar das condições favoráveis à implantação da geração distribuída de energia fotovoltaica, a capacidade instalada é muito inferior ao potencial de geração existente, evidenciando a presença de fatores que dificultam a maior adoção e difusão desta tecnologia. Assim, este capítulo identifica o panorama da geração distribuída de energia fotovoltaica e barreiras que comprometem a sua maior difusão na região sul do Brasil, com base na literatura existente e em entrevistas qualitativas com profissionais do setor elétrico. Os resultados mostraram que há expectativa de crescimento desta fonte de energia solar, mas ainda há muito a ser feito para consolidá-la na matriz elétrica, dada a existência de barreiras técnicas, econômicas, sociais, gerenciais e políticas. Entre as principais barreiras identificadas destacam-se a má qualidade dos sistemas fotovoltaicos, o alto custo do investimento inicial, a dependência de financiamentos para compra de módulos solares, a cultura dos consumidores, a falta de conhecimento acerca da tecnologia fotovoltaica, os serviços de pós-vendas ineficientes, a dependência de importação de componentes fotovoltaicos e a falta de políticas de incentivo à geração fotovoltaica. Os resultados deste estudo permitem compreender a difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica em economias emergentes ou em regiões onde a implementação de sistemas fotovoltaicos ainda é incipiente.

**Palavras-chave:** Energia Fotovoltaica; Geração Distribuída; Difusão de Inovação

## Resumo gráfico:



## Abreviações:

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

FIERGS: Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul

FIESC: Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina

ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

FV: Fotovoltaico

P&D: Pesquisa e Desenvolvimento

REN: Resolução Normativa

SIN: Sistema Interligado Nacional

TUSD: Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

## 2.1 INTRODUÇÃO

O aumento demográfico, acompanhado pelos progressos tecnológicos e econômicos, faz com que as pessoas precisem de mais eletricidade para sustentarem um ambiente de vida melhor (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017). O aumento da demanda por eletricidade é visto como resultado da recuperação econômica de países em desenvolvimento e é considerado um fator importante na aceleração das mudanças climáticas e ambientais observadas e descritas pela comunidade científica. Para melhorar os parâmetros socioeconômicos nos países emergentes, a atual tendência de crescimento indica que o consumo energético nesses países excederá o consumo nos países desenvolvidos nas próximas décadas (FERREIRA et al., 2018).

O aumento significativo do consumo de energia elétrica requer investimentos e fontes alternativas para que a demanda seja atendida, uma vez que os recursos ambientais não renováveis são escassos e finitos (PONSIOEN; VIEIRA; GOEDKOOOP, 2014). Além disso, a queima de combustíveis fósseis tradicionais causa uma série de problemas ambientais, como mudanças climáticas, poluição e aquecimento global (CORAM; KATZNER, 2018). Dessa forma, o atual desafio das economias em desenvolvimento é atender ao aumento do consumo e reduzir o impacto gerado pelo uso de fontes não renováveis, estimulando a exploração de fontes de energia renováveis através da análise de fatores políticos, econômicos e ambientais envolvidos na geração de eletricidade (ROSA; SILUK; MICHELS, 2016; SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Diante desse cenário, as alternativas de energia renovável tornaram-se o foco de muitos estudos sobre questões ambientais e econômicas. Alguns países europeus estão na vanguarda dos investimentos tecnológicos e regulatórios em geração de energia mais limpa, permitindo que os países emergentes aprendam com suas experiências (PINTO; AMARAL; JANISSEK, 2016). Devabhaktuni et al. (2013) e Kabir et al. (2018) apontam a energia solar como uma das principais fontes energéticas na transição da geração de energia elétrica por recursos não renováveis para a geração baseada em fontes renováveis. Essa ênfase ocorre porque a fonte solar tem o potencial de satisfazer adequadamente as demandas de energia de todo o mundo, desde que as tecnologias para seu uso estejam prontamente disponíveis (REDISKE et al., 2018). Devido à sua perspectiva de rápido crescimento e altos níveis de investimento envolvidos, o mercado fotovoltaico (FV) está sendo disputado em todo o mundo, especialmente na Europa, China e nos Estados Unidos. No Brasil, os avanços estão se tornando significativos,

principalmente após a inserção da energia solar na matriz elétrica nacional e o início dos leilões de energia solar em resposta a um período de dificuldades decorrentes da redução da energia hidrelétrica e do aumento dos preços da energia elétrica (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

O Brasil destaca-se na captação de energia solar por possuir uma grande área geográfica com condições favoráveis, levando a altos índices de irradiação (DIAS et al., 2017). Ademais, outros fatores convergem para tornar o Brasil um local ideal para a produção de energia solar, incluindo a existência de grandes reservas de quartzo que podem gerar vantagens competitivas para a produção de silício, componente de células fotovoltaicas (ECHEGARAY, 2014). Esses aspectos podem abrir caminho para um papel importante da tecnologia fotovoltaica na diversificação da matriz de energia elétrica (DE FARIA JR.; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017).

A matriz elétrica brasileira é composta principalmente por fontes hidráulicas e de gás natural, que requerem grandes investimentos e, muitas vezes, mais de cinco anos para estarem totalmente operacionais (EPE, 2017; PINTO; AMARAL; JANISSEK, 2016). Isso significa que a matriz elétrica é, em sua maior parte, renovável, mas também que o país depende da disponibilidade estocástica de água para gerar 65,2% de sua eletricidade (DE FARIA JR.; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017; EPE, 2021). A alta dependência da energia hidráulica é dificultada pela baixa precipitação durante as estações secas, e os suprimentos de gás natural são diretamente afetados pelas instabilidades política e diplomática (GUERRA et al., 2015). Desse modo, estudos indicam crescimento futuro da tecnologia solar fotovoltaica no país como uma fonte geradora alternativa, principalmente no que tange à geração distribuída (VIANA; MANASSERO; UDAETA, 2018).

Através das iniciativas de acesso à micro e mini geração distribuída de energia fotovoltaica e ao sistema de compensação de energia publicadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012a), foi possível projetar uma redução de 9% do uso de energia do Sistema Interligado Nacional<sup>1</sup> até 2050, com grande contribuição proveniente da geração dos setores residencial e comercial (EPE, 2016a). Apesar do menor número de horas de sol nos meses mais frios, a região sul apresenta boa irradiação, com níveis superiores aos da região

---

<sup>1</sup> O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um conjunto de instalações e equipamentos que permitem o fornecimento de eletricidade nas regiões do Brasil interligadas eletricamente (ANEEL, 2014).

norte, embora ligeiramente abaixo de sudeste, centro-oeste e, principalmente, nordeste (PEREIRA et al., 2017). Os estados da região sul contêm o segundo maior número de sistemas de geração distribuída fotovoltaica, com 139.889 conexões, representando 21,91% dos sistemas conectados à rede brasileira (ANEEL, 2021). No entanto, a capacidade instalada ainda é muito inferior ao potencial de geração da região, evidenciando a existência de fatores que dificultam a maior adoção e difusão dessa tecnologia.

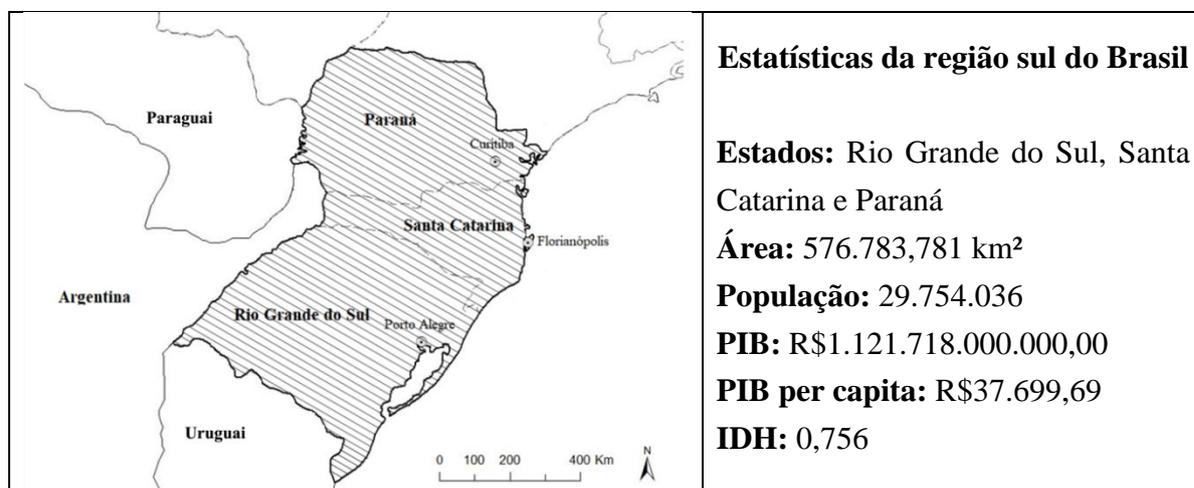
Na região sul do Brasil, ainda não há implantação expressiva de sistemas fotovoltaicos conectados à rede com potência instalada relevante, em comparação com países como Alemanha, Itália e Espanha (TIEPOLO et al., 2014). Embora menores do que no passado, os custos de geração solar continuam sendo maiores do que algumas fontes utilizadas na geração de energia elétrica. No entanto, a curva de aprendizado do setor está em evolução e os custos associados tiveram reduções significativas, o que pode indicar que a fonte se tornará competitiva no futuro (FERREIRA et al., 2018).

Na literatura acadêmica, foi possível observar que os estudos são focados no mapeamento da diversidade na indústria solar fotovoltaica e na compreensão do progresso técnico em termos de inovação e difusão para mitigar as mudanças climáticas (LACERDA; VAN DEN BERGH, 2016), bem como no entendimento das formas de obtenção de energia, custos, vantagens e desvantagens (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017). Adicionalmente, há estudos que investigam as barreiras à adoção de sistemas fotovoltaicos através de revisão sistemática da literatura (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015) e buscam compreender o desenvolvimento da tecnologia em diferentes países, como Tanzânia (KASSENGA, 2008), Índia (SAHOO, 2016), Finlândia (SAIKKU et al., 2017) e Bangladesh (HOSSAIN, M. F.; HOSSAIN, S.; UDDIN, 2017). No cenário brasileiro, estudos analisam as perspectivas futuras da energia fotovoltaica no estado de Minas Gerais (DINIZ et al., 2011), identificam como a pesquisa de mercado é fundamental para projetos fotovoltaicos no país (ECHEGARAY, 2014), analisam a política brasileira de geração distribuída de energia fotovoltaica e comparam os resultados com a experiência de outros países (AMARAL et al., 2016), e discutem cenários para aplicações fotovoltaicas no Brasil através da análise de viabilidade (MARTINS et al., 2008). Desse modo, nenhum dos estudos apresentou o mesmo foco deste trabalho, evidenciando a singularidade desta pesquisa.

Alguns pesquisadores afirmam que o crescimento da participação da energia fotovoltaica na matriz elétrica é um processo complexo, uma vez que a adoção efetiva da

inovação envolve diversos fatores interligados (FRATE; BRANNSTROM, 2017; DOS SANTOS; CANHA; BERNARDON, 2018). Dessa forma, este capítulo tem como objetivo identificar o panorama da geração distribuída de energia fotovoltaica, enfatizando as barreiras que comprometem a maior adoção e difusão desta tecnologia na região sul do Brasil, cujas principais estatísticas socioeconômicas são apresentadas na Figura 3. Tendo em vista a natureza exploratória da pesquisa, um método qualitativo é utilizado na condução desse estudo. Assim, entrevistas semiestruturadas foram realizadas com 12 profissionais de concessionárias de energia, associação de empresas e cadeias produtivas do setor fotovoltaico, pesquisador acadêmico, cliente, fornecedor de sistemas de energia fotovoltaica, membro do governo e consultor na área de energia da região. O estudo fornece informações sobre as expectativas futuras acerca da tecnologia fotovoltaica, bem como um *framework* explicando como as barreiras podem ser classificadas e avaliadas de acordo com cinco aspectos fundamentais relacionados à adoção dessa tecnologia: técnicos, econômicos, sociais, gerenciais e políticos.

Figura 3 - Estatísticas socioeconômicas da região sul do Brasil



Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

Este capítulo está estruturado em cinco subcapítulos. No subcapítulo dois, é identificada a literatura relevante que descreve o processo de adoção e difusão da tecnologia fotovoltaica. O subcapítulo três apresenta o método de pesquisa, descrevendo as etapas necessárias para a condução do estudo qualitativo. O subcapítulo quatro apresenta a descrição das entrevistas realizadas e a análise das informações obtidas, enquanto o subcapítulo cinco estabelece as considerações finais, enfatizando as implicações do estudo.

## 2.2 DETERMINANTES DA DIFUSÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Fatores determinantes da difusão e adoção de novas tecnologias têm sido de grande interesse para cientistas de diferentes áreas (CURTIUS, 2018). A difusão é comumente utilizada para explicar o processo pelo qual indivíduos e empresas em uma sociedade ou economia adotam uma nova tecnologia ou substituem uma tecnologia defasada por uma nova (CHO; KOO, 2012; PERES; MULLER; MAHAJAN, 2010). No âmbito da geração distribuída de energia fotovoltaica, destaca-se uma certa lentidão no seu processo de difusão, devido principalmente ao conflito entre os custos econômicos, os benefícios ambientais da redução das emissões de carbono e a incongruência com os sistemas energéticos existentes (ISLAM, 2014). Ademais, Zhai e Williams (2012) argumentam que o processo de difusão de fontes renováveis não é uma tarefa trivial, pois envolve incertezas decorrentes de aspectos tecnológicos, econômicos e sociais. Ainda, os artigos baseados nas teorias de difusão de inovação (FRAMBACH; SCHILLEWAERT, 2002) e tecnologias de energia fotovoltaica (CURTIUS, 2018; DOS SANTOS; CANHA; BERNARDON, 2018; ISLAM, 2014) indicam que a investigação do crescimento da geração distribuída de energia fotovoltaica e das barreiras para sua adoção deve considerar cinco dimensões: técnica, econômica, social, gerencial e política. Essas cinco dimensões foram selecionadas porque compreendem uma ampla gama de aspectos que influenciam a difusão de sistemas fotovoltaicos.

A dimensão técnica engloba aspectos limitantes que tangem à qualidade do sistema fotovoltaico, à durabilidade dos módulos, à falha dos componentes e confiabilidade na operação, bem como à manutenção e serviço ignorados e não incluídos como parte do desenvolvimento do projeto (BROOKS; URMEE, 2014). Sahoo (2016) destaca que as principais barreiras técnicas incluem baixa eficiência de conversão de módulos FV, limitações de desempenho de componentes do sistema e fornecimento inadequado de matérias-primas. Além disso, embora existam normas técnicas para instalação dos sistemas fotovoltaicos, requisitos explícitos para a realização de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor ainda não foram definidos (ZOU et al., 2017).

A dimensão econômica tem maior importância para os potenciais portadores do sistema fotovoltaico, uma vez que, ao instalar o sistema, o consumidor se preocupa com o benefício econômico (DOS SANTOS; CANHA; BERNARDON, 2018). Desse modo, devem ser considerados o tempo de retorno do investimento (*payback*), o financiamento para a compra do

sistema FV, o custo de materiais e instalação e o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) incidente sobre a energia solar (ORIOLO; DI GANGI, 2014). Ademais, Vale et al. (2017) afirmam que a variação das tarifas de energia influencia a análise econômica do investimento, e o valor presente líquido e a taxa interna de retorno são parâmetros importantes para análise de viabilidade econômica de projetos de geração distribuída de energia fotovoltaica.

A transição para a energia proveniente de recursos renováveis enfrenta diversos desafios socioculturais relacionados ao planejamento de projetos de energias renováveis, à aceitação de mudanças locais e à adoção de novas tecnologias. Nesse âmbito, destaca-se a importância dos cidadãos e comunidades para o sucesso de uma transição sustentável (SÜSSER; KANNEN, 2017). Rosa, Siluk e Michels (2016) afirmam que a geração de energia FV é uma inovação descontínua, ou seja, um produto inteiramente novo, que leva os clientes a se dividirem com relação à percepção de risco implícita ao processo e que exige uma mudança de comportamento e cultura dos consumidores para que os benefícios possam se efetivar. Ainda, destaca-se que a falta de conhecimentos específicos dos potenciais investidores acerca da adoção da tecnologia de energia renovável é um dos principais obstáculos para a difusão da geração fotovoltaica (DÜŞTEGÖR et al., 2018).

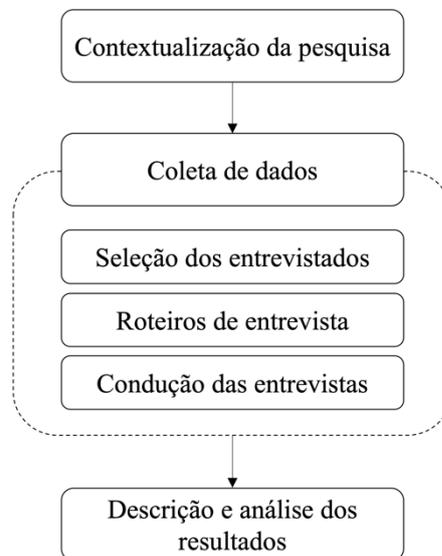
A gestão insuficiente e inadequada é uma das principais barreiras na difusão de novas tecnologias, especialmente para sistemas fotovoltaicos. Os aspectos gerenciais limitantes à adoção da geração FV englobam os serviços de pós-vendas ineficientes, como assistência técnica, monitoramento e manutenção, além de abordagens de marketing e campanhas de educação ineficazes (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015).

O aspecto político envolve modelos tarifários, políticas de taxas de juros, políticas de subsídios para a compra de sistemas fotovoltaicos e impostos de importação (DOS SANTOS; CANHA; BERNARDON, 2018). De acordo com Dias et al. (2017), há necessidade de mudanças na legislação brasileira para que a tecnologia fotovoltaica se expanda, tendo em vista os altos impostos às empresas para os sistemas de transmissão e distribuição e aos consumidores que empregam fontes alternativas de energia. Além disso, destaca-se a deficiência nos sistemas de compensação de energia, estabelecidos por meio de uma resolução normativa que permite aos proprietários de micro e mini geração o recebimento de créditos pela energia ativa gerada além do nível de consumo do usuário (DE FARIA JR.; TOSO; CAVALCANTI, 2017).

### 2.3 MÉTODO

Metodologicamente, esta fase da pesquisa foi organizada em três etapas, apresentadas na Figura 4. O estudo baseou-se em uma abordagem exploratória qualitativa, utilizando entrevistas semiestruturadas realizadas pessoalmente e de maneira online, dependendo da disponibilidade dos entrevistados. Entrevistas semiestruturadas criam uma diretriz para a definição dos principais tópicos a serem abordados, ao mesmo tempo que permitem a flexibilidade necessária para que os respondentes forneçam suas perspectivas individuais e criem oportunidades para que novas ideias sejam expressas (AIKENHEAD et al., 2015; CURTIUS, 2018). Entrevistas qualitativas já demonstraram ser úteis em pesquisas que analisam barreiras e direcionadores para investimentos em fontes de energia renováveis (KEELEY; MATSUMOTO, 2018).

Figura 4 - Etapas metodológicas



A primeira etapa compreendeu a contextualização teórica sobre os principais conceitos relacionados à geração de energia fotovoltaica e aos fatores determinantes para a adoção desta tecnologia. A coleta de dados englobou a seleção de entrevistados, a elaboração dos roteiros de perguntas e a condução das entrevistas para obtenção de informações acerca do contexto de geração fotovoltaica na região sul do Brasil, que são apresentadas e discutidas na etapa de

descrição e análise dos resultados. Na sequência, são detalhadas as três etapas metodológicas adotadas para o desenvolvimento do primeiro estudo que compõe esta tese.

### 2.3.1 Contextualização da pesquisa

A partir da definição do problema e dos objetivos do estudo, uma revisão da literatura foi conduzida para apoiar e justificar a importância do projeto. Para isso, foram pesquisadas as combinações das palavras-chave "*photovoltaic energy*", "*solar home system*", "*Brazilian energy matrix*", "*barriers*" e "*trends*" nas bases de dados ScienceDirect, Emerald e Scopus, durante o período de 2008 a 2018, resultando em 11 artigos relevantes para o estudo.

Na literatura acadêmica, foi possível identificar um estudo que aborda o status e o potencial do desenvolvimento da energia solar fotovoltaica na Tanzânia, bem como as limitações à disseminação dessa tecnologia (KASSENGA, 2008). Outro artigo discute cenários energéticos para aplicações FV no Brasil e realiza uma análise de viabilidade para geração de energia (MARTINS et al., 2008), enquanto Diniz et al. (2011) fornecem perspectivas futuras da energia fotovoltaica no Brasil, especificamente no estado de Minas Gerais. Echegaray (2014) discute como a pesquisa de mercado foi fundamental no desenvolvimento do primeiro projeto FV no Brasil, e Karakaya e Sriwannawit (2015) investigam as barreiras à adoção de sistemas FV em diversos contextos com base em uma revisão sistemática da literatura.

A literatura também apresenta estudos discutindo o progresso da energia FV na Índia (SAHOO, 2016), bem como os benefícios e problemas relacionados ao uso de sistemas solares em Bangladesh (HOSSAIN; HOSSAIN; UDDIN, 2017) e na Finlândia (SAIKKU et al. 2017). Ademais, Lacerda e Van Den Bergh (2016) mapeiam a diversidade na indústria solar fotovoltaica e contribuem para a compreensão do papel da diversidade no estímulo ao progresso técnico em termos de inovação e difusão para mitigar as mudanças climáticas. Amaral et al. (2016) analisam a política brasileira de geração distribuída fotovoltaica, enquanto Sampaio e González (2017) apresentam o estado da arte da energia solar FV por meio de uma pesquisa bibliográfica sistemática.

Através das informações obtidas nos principais artigos identificados, foi observado o aumento do consumo de energia elétrica para atender atividades cotidianas da população e das empresas. Além disso, ficou evidenciado o cenário de transição de geração de energia baseada em recursos não-renováveis para renováveis, destacando-se a energia fotovoltaica como uma

das principais fontes geradoras. Identificou-se ainda o potencial solar brasileiro, apontando o crescimento da participação FV na matriz elétrica nacional, mas também a existência de barreiras que comprometem a maior adoção dessa tecnologia.

### **2.3.2 Coleta dos dados**

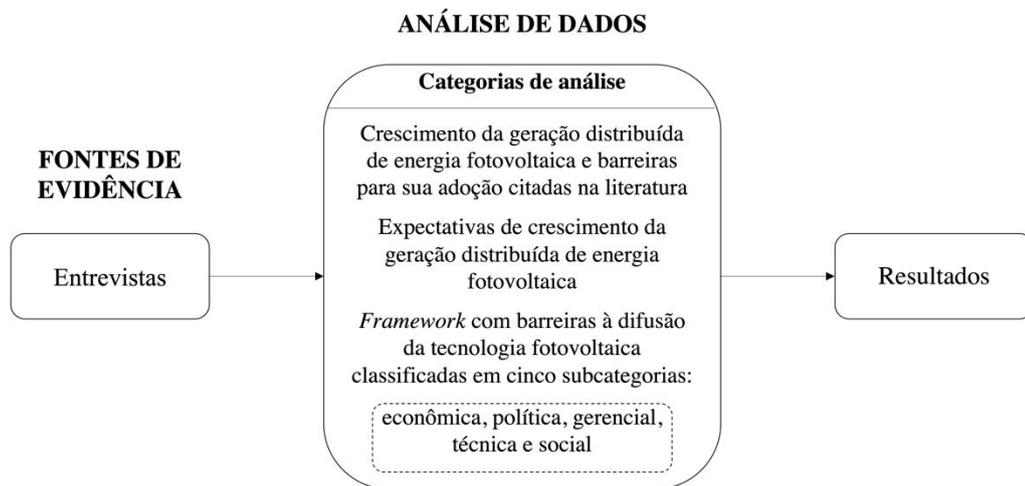
Tendo em vista a característica exploratória desta etapa da pesquisa, foi utilizada uma abordagem qualitativa, envolvendo entrevistas semiestruturadas realizadas de forma presencial e online. A seleção dos entrevistados foi feita intencionalmente, incluindo profissionais dos estados do sul do Brasil envolvidos no processo de geração, transmissão e distribuição de eletricidade e geração distribuída de energia fotovoltaica. A amostra foi composta por 12 entrevistados: um profissional de uma associação de empresas e cadeias produtivas do setor fotovoltaico, seis profissionais de empresas de distribuição de eletricidade, um pesquisador acadêmico, um cliente, um fornecedor de sistemas de energia fotovoltaica, um membro do governo e um consultor da área de energia na região sul. Assim, essa amostra é representativa, pois abrange diversas perspectivas em um mesmo contexto, além de contar com a participação de entrevistados vinculados a instituições de alto renome e impacto estratégico para a região em estudo.

O roteiro de entrevista foi adaptado para cada grupo de respondentes para levar em consideração os diferentes tipos de envolvimento no processo de adoção de sistema de geração de energia fotovoltaica, como pode ser visto nos Apêndices A.1 a A.5. Os tópicos foram baseados em uma revisão da literatura acerca do panorama da geração fotovoltaica a níveis mundial, nacional e estadual, além de *frameworks* existentes e categorizações derivadas da análise de barreiras à difusão dessa tecnologia (CURTIUS, 2018; DOS SANTOS; CANHA; BERNARDON, 2018; KEELEY; MATSUMOTO, 2018). O roteiro de entrevista semiestruturada forneceu espaço para que novos temas fossem abordados durante as entrevistas. O propósito da utilização de questões abertas era permitir que os entrevistados elaborassem espontaneamente suas respostas acerca da geração de energia e das barreiras para a adoção da tecnologia fotovoltaica, evitando restrições impostas pelo entrevistador. As entrevistas presenciais duraram entre 15 e 65 minutos e foram realizadas entre maio de 2018 e janeiro de 2019, e as informações adquiridas foram gravadas em áudio e posteriormente transcritas para um documento, em que foram agrupadas com as entrevistas obtidas de maneira online.

### 2.3.3 Descrição e análise dos resultados

Na etapa de descrição e análise dos resultados, conforme apresentado na Figura 5, as informações foram analisadas e codificadas de acordo com categorias e subcategorias de respostas, definidas conforme o roteiro de entrevista e os temas identificados. A frequência de subcategorias foi verificada e serviu de base para avaliar a importância de um tema, como as expectativas e barreiras que foram citadas diversas vezes pelos entrevistados.

Figura 5 - Estrutura para análise dos dados



Conforme o fluxograma apresentado na Figura 5, as fontes de evidência utilizadas foram analisadas de acordo com três categorias. Inicialmente, foi realizada uma comparação dos dados de crescimento da geração distribuída de energia fotovoltaica e das barreiras identificadas com o embasamento teórico, e as entrevistas foram contrastadas com as informações verificadas na literatura. Ressalta-se que as entrevistas constituem fontes de dados cuja percepção de crescimento e barreiras advém de contextos e situações distintos e têm o objetivo de contribuir na identificação de perspectivas similares nas diferentes respostas.

Posteriormente, utilizou-se de fragmentos das entrevistas para a identificação das expectativas de crescimento da geração distribuída de energia fotovoltaica e das barreiras à difusão dessa tecnologia, através da análise de discurso. Por último, foi elaborado um *framework* contendo as barreiras identificadas por meio de entrevistas e literatura, classificando-as em cinco subcategorias de análise: técnica, econômica, social, gerencial e

política. Além disso, para incentivar a difusão da tecnologia fotovoltaica, foram sugeridas medidas para superar as barreiras.

#### 2.4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta o perfil dos respondentes selecionados para comporem a amostra da pesquisa, de acordo com informações obtidas durante o período de realização das entrevistas. Para preservar a identidade dos respondentes e possíveis conflitos de interesse, foram utilizados os códigos "Ai" para o responsável pela associação de empresas do setor fotovoltaico, "Ci" para os profissionais das concessionárias de energia, "CLi" para o cliente que instalou o sistema fotovoltaico, "MGi" para o membro do governo, "Oi" para o fornecedor de sistemas de energia fotovoltaica, "Ri" para o pesquisador na área de energia fotovoltaica e "SCi" para o consultor estratégico na área de energia.

Tabela 1 - Perfil dos entrevistados

(continua)

| <b>Código</b> | <b>Perfil</b>   |
|---------------|---|
| A1            | Bacharel em Administração, com 3 anos de experiência na geração de energia fotovoltaica. Atualmente, faz parte de uma associação de empresas e cadeias produtivas do setor fotovoltaico da região sul do Brasil.  |
| C1            | Engenheiro eletricista em uma grande concessionária de serviços de distribuição de energia elétrica da região sul do Brasil. Atualmente, atua no setor de projetos especiais da companhia.  |
| C2            | Engenheiro eletricista há 6 anos em uma grande concessionária de serviços de distribuição de energia elétrica da região sul do Brasil. Atua nos setores de pesquisa e desenvolvimento, eficiência energética e planejamento do sistema elétrico da companhia. |
| C3            | Engenheiro eletricista há 1 ano em uma cooperativa de distribuição de energia elétrica da região sul do Brasil.   |
| C4            | Diretor técnico de uma concessionária de distribuição de energia elétrica da região sul do Brasil, onde trabalha há 32 anos.  |

Tabela 1 - Perfil dos entrevistados

(conclusão)

|     |   |
|-----|---|
| C5  | Diretor técnico comercial de uma companhia de distribuição de energia elétrica da região sul do Brasil, onde trabalha há 30 anos.   |
| C6  | Engenheiro eletricitista há 14 anos em uma concessionária de distribuição e comercialização de energia elétrica da região sul do Brasil.  |
| CL1 | Cliente que instalou sistema fotovoltaico em sua empresa e residência há 3 anos e pretende instalar em sua propriedade rural na região sul do Brasil.   |
| MG1 | Membro do governo, atuando há 5 anos como gerente de planejamento energético, bem como Diretor de Inovações, Fontes de Energia e Mineração de um dos estados da região sul do Brasil.                               |
| O1  | Proprietário de uma empresa metalúrgica localizada no sul do Brasil, fornecendo soluções há 16 anos em energias renováveis através da instalação de módulos fotovoltaicos para residências, condomínios e empresas. |
| R1  | Doutor em Engenharia Elétrica e pesquisador na área de energia solar fotovoltaica há 10 anos em uma universidade federal da região sul do Brasil.   |
| SC1 | Consultor estratégico na área de energia e assessor de infraestrutura de uma federação vinculada a um estado da região sul do Brasil, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento do setor fotovoltaico.      |

As subseções seguintes descrevem e analisam de maneira detalhada os resultados das entrevistas conduzidas na presente pesquisa.

#### 2.4.1 Descrição dos resultados

Inicialmente, os entrevistados foram questionados a respeito da composição da matriz elétrica e a taxa de crescimento anual de consumo de eletricidade de seus estados de abrangência na região sul do Brasil. C3 informou que "a matriz elétrica é predominantemente formada por hidrelétricas, seguida por termelétrica. Há grande crescimento de geração através de energias renováveis, como a eólica e a solar, mas ainda com representação pequena perto das formas mais tradicionais de geração". C2 complementou a informação dizendo que "utilizamos a mesma energia fornecida ao SIN. Contudo, possuímos usinas termelétricas, hidrelétricas,

parques eólicos, pequenas centrais hidrelétricas e pequenos empreendimentos de energia solar distribuída", sendo esta afirmação corroborada por Freitas et al. (2019) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016b). A taxa de crescimento anual de consumo de energia dos estados sulistas, de acordo com C4, "foi de 3,1%", informação confirmada pela EPE (2018a).

Quando questionados acerca da previsão de crescimento para alguma fonte específica de geração de energia, C3 afirmou "ter grande espaço para a energia solar, em especial por meio da microgeração distribuída", enquanto C1 argumentou que "a fonte que mais cresceu foi a eólica". C2 e O1 complementaram as opiniões dos demais profissionais, apontando que há uma tendência nacional de crescimento da geração de energia solar e também da geração de energia eólica, decorrente do apelo por energias mais limpas, razão pela qual CL1 adotou o sistema fotovoltaico. Os entrevistados também destacaram a ascensão da geração distribuída de energia como uma solução à "dependência de geração através de centrais hidrelétricas, contribuindo para a redução de perdas nos circuitos e a elevação do montante de energia gerada" (C3). Desse modo, C2 e C4 salientam que "atualmente a principal fonte de geração distribuída é a eólica em médio porte e a fotovoltaica na parte de microgeração".

Os respondentes afirmaram que, na região sul do Brasil, a energia fotovoltaica "corresponde a uma pequena parcela da geração de energia" (C3), sendo que "o mercado não alcançou nem 2% do potencial fotovoltaico existente" (A1). No entanto, apesar da "dificuldade de previsão dos montantes" (C5), a expectativa é de crescimento significativo (C4, CL1, O1, R1, SC1), tendo observado "o interesse da instalação de microgeradores fotovoltaicos no mercado e junto aos consumidores" (C3). Além disso, C2 ressaltou que, para prever a geração distribuída de energia fotovoltaica, "é necessária a definição de diversos parâmetros, relacionados à irradiação solar, potência dos módulos instalados, orientação solar e área do sistema". SC1 afirmou que o Programa Indústria Solar, desenvolvido pela Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina (FIESC) e pela Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul (FIERGS), foi criado para incentivar o crescimento do consumo de energia solar residencial e industrial. O programa começou em setembro de 2018 e fornece kits de geração residencial e industrial com potências predefinidas e visa promover um setor de produção mais moderno, eficiente, sustentável e competitivo na região.

Para o desenvolvimento e expansão do setor fotovoltaico, A1 destacou que "montantes em pesquisa, desenvolvimento e inovação têm sido investidos em projetos de melhoria de módulos e inversores", enquanto C1 afirmou que "a concessionária está criando uma usina

fotovoltaica experimental a fim de verificar o comportamento do alimentador diante das oscilações dessa fonte de energia". As demais concessionárias apontaram os maiores investimentos do setor energético para projetos de "controle de perdas e eficiência energética" (C5, C6), "conservação de energia" (C4), "detectores de falhas, equipamentos de inspeção e auxílio à manutenção, além de mobilidade elétrica" (C2). Como o Brasil não possui uma política industrial focada na geração distribuída fotovoltaica, R1 afirmou que a maioria das pesquisas no país se concentra no uso e impacto desse tipo de geração no sistema elétrico e, para contornar esse fator, as instituições de ensino estão capacitando recursos humanos, promovendo o desenvolvimento tecnológico e prestando serviços tecnológicos avançados às empresas como forma de adquirirem maior *expertise* no campo e contribuir para o setor. Além disso, O1 afirmou que grandes investimentos foram destinados a projetos de automação residencial e otimização do uso de energia enquanto é gerada, fator que R1 disse ser uma direção obrigatória para resolver problemas relacionados ao armazenamento de energia, possibilitando a redução do tempo de retorno do investimento.

Quando questionado sobre os principais fatores que limitam a maior adoção à geração distribuída de energia fotovoltaica, A1 afirmou que "o maior gargalo é a questão financeira, pois o brasileiro está acostumado com financiamento". Além disso, há uma barreira cultural dos consumidores e também o fato de as universidades, por exemplo, realizarem projetos isolados de pesquisa e desenvolvimento (P&D) no setor fotovoltaico, com diferentes focos. Outro grande problema é que as pessoas estão colocando sistemas de instalação à venda, sem a presença de profissionais e de suporte pós-vendas, o que pode danificar a imagem do sistema fotovoltaico. CL1 corroborou essas informações, alegando que "a falta de dinheiro da população, a necessidade de financiamento, conveniência e fatores culturais estão limitando a maior adoção da tecnologia fotovoltaica". C1 disse que "além de fatores financeiros e burocracias com governos municipal, estadual e federal em questões ambientais e licenciamento de investimentos, tem-se a dependência de importação de módulos fotovoltaicos da China, pois, apesar de haver empresas brasileiras que fabricam esses materiais, o valor não compensa. Por parte da concessionária existem preocupações quanto ao despacho de carga, tendo em vista que a fonte fotovoltaica é bastante oscilante".

Na opinião de C2 quanto às barreiras à difusão fotovoltaica, "verifica-se a inviabilidade técnica das residências, pois muitas delas não possuem boa orientação solar e a arquitetura dos telhados faz com que os mesmos possuam sombra em parte do dia. Na região de abrangência

da concessionária de distribuição em que atua, 40% dos consumidores que estavam dispostos a pagar pelo equipamento tiveram seus pedidos negados pela concessionária por questões como orientação e tamanho do telhado ou áreas com sombra". Para C3, C4 e C6, as principais barreiras são o valor e o tempo de retorno do investimento, o custo de implantação e o custo dos equipamentos, enquanto para C5 "existem regras mal definidas para a implantação do sistema fotovoltaico, os fornecedores de módulos fotovoltaicos aceitam vender apenas todo o pacote (projeto, material e mão de obra) e há poucas opções de financiamento para o cliente residencial". R1 apontou que "as maiores barreiras técnicas correspondem à intermitência e variabilidade da geração solar, com a ausência de armazenamento local". Além disso, R1 destacou como barreiras a política regulatória, desenvolvimentos técnicos e a necessidade de uma mudança cultural da população da região sul do país a médio prazo. R1 e SC1 disseram que a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) é outro fator limitante que pode aumentar o custo para o consumidor. A tarifa é cobrada pelas concessionárias e regulamentada pela ANEEL, sendo um valor para compensar o uso do sistema por clientes que também geram sua própria energia e a injetam na rede.

Quando questionado sobre o cenário elétrico no sul do Brasil, MG1 comentou que o governo tem expectativas de expansão do mercado de geração distribuída. Com relação às políticas que regulam o setor fotovoltaico, MG1 apontou que um dos incentivos à adoção da energia solar fotovoltaica está relacionado ao "ICMS<sup>2</sup> apenas sobre a diferença líquida de energia consumida, bem como à isenção desse imposto sobre operações com vários equipamentos e componentes para o uso de energia solar e eólica". Outros incentivos governamentais se referem à "isenção de licenciamento ambiental para geração própria e geração distribuída de eletricidade a partir de fontes solares" e à facilitação de financiamento para clientes residenciais e industriais por meio de bancos e agências de desenvolvimento. MG1 apontou que um Atlas Solarimétrico foi publicado com informações detalhadas sobre o potencial de radiação solar da região, sendo uma "ferramenta fundamental para atrair empresas do setor, identificar o potencial da energia solar, promover o conhecimento inerente ao uso

---

<sup>2</sup> O ICMS é o imposto brasileiro sobre operações relacionadas à movimentação de mercadorias e serviços (CÂMARA DOS DEPUTADOS DO BRASIL, 1996).

desta fonte de energia, além de gerar um banco de dados para futuros empreendimentos na região".

## **2.4.2 Análise dos resultados**

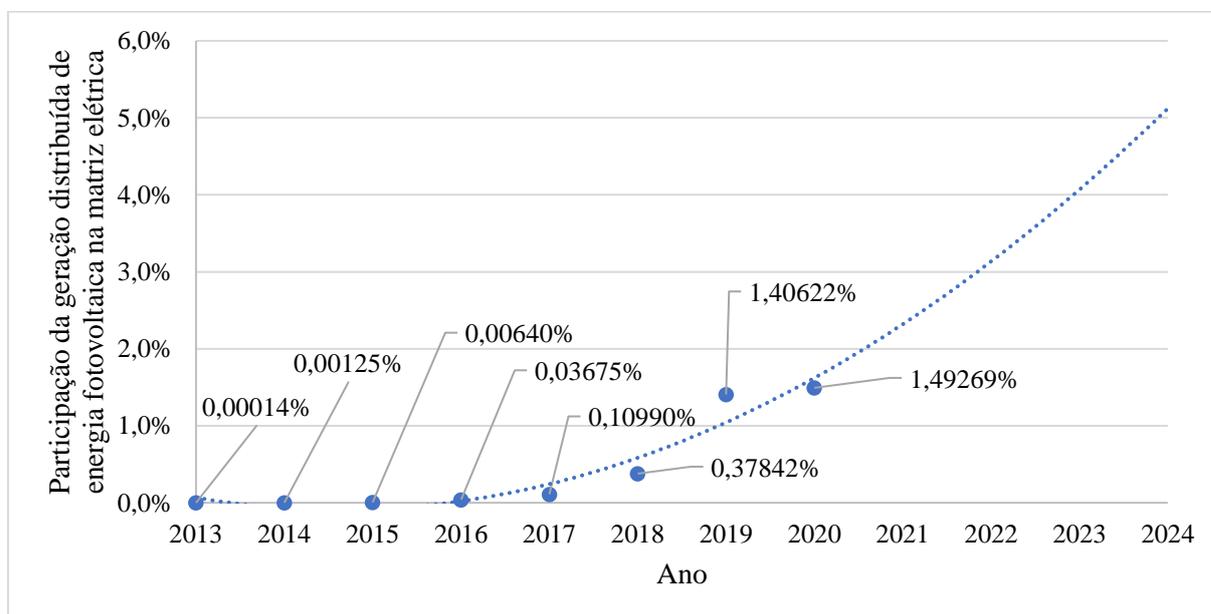
Este tópico analisa os resultados encontrados considerando as entrevistas com profissionais do setor elétrico e as informações obtidas na literatura acadêmica. Inicialmente é apresentado o panorama da geração distribuída de energia fotovoltaica, explicando a expectativa futura de sua participação na matriz elétrica da região sul do Brasil. Ainda, são discutidos os fatores identificados que limitam a maior adoção e difusão da tecnologia fotovoltaica na região sob as dimensões técnica, econômica, social, gerencial e política.

### *2.4.2.1 Panorama da geração distribuída de energia fotovoltaica*

Do ponto de vista dos entrevistados, há uma grande expectativa de crescimento da geração distribuída de energia fotovoltaica, que atualmente representa aproximadamente 98,3% de todas as fontes de geração distribuída na região sul do Brasil (ANEEL, 2021). De 2013 a 2020, houve um crescimento elevado na potência instalada da tecnologia. Esse crescimento pode estar associado à curva S de difusão de inovações. Alguns investidores mais corajosos decidiram confiar na nova concepção de mercado e, gradualmente, observando que o investimento foi positivo para os pioneiros, outros passam a investir nessa nova tecnologia, até que futuramente somente alguns terão resistido à mudança.

Apesar do crescimento significativo, o número de unidades com geração distribuída fotovoltaica ainda é pequeno, principalmente ao verificar o potencial brasileiro de aproveitamento de energia solar e o modo como essa fonte é utilizada em outros países. A Figura 6 apresenta a evolução da participação da geração distribuída de energia fotovoltaica na matriz elétrica da região sul-brasileira, levando em consideração dados extraídos do portal da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021) e de relatórios de Balanços Energéticos Nacionais da Empresa de Pesquisa Energética de 2013 a 2020 (EPE, 2014, 2015, 2016c, 2017, 2018b, 2019, 2020, 2021). A figura mostra a relação entre a potência instalada de micro e mini geração fotovoltaica e a potência total de eletricidade instalada durante o período analisado.

Figura 6 - Evolução da participação da geração distribuída de energia fotovoltaica na matriz elétrica da região sul do Brasil



A Figura 6 indica um crescimento da participação da geração distribuída fotovoltaica na matriz elétrica da região sul do Brasil, apontando, através de uma linha de tendência, para uma representação de aproximadamente 5,1% em 2024. Utilizou-se uma linha de tendência polinomial, uma vez que foi o modelo que melhor se ajustou aos dados, com coeficiente de determinação de 0,922. Apesar de corresponder a uma pequena parcela da geração total de energia, ressalta-se que é uma participação significativa, tendo em vista que a geração provém exclusivamente de unidades com pequenas potências instaladas. Além disso, conforme mencionado pelos entrevistados, a região estudada apresenta um relevo único, com grandes rios que tornam a fonte hidrelétrica predominante na matriz elétrica, diferentemente de países como a Alemanha, cuja falta de recursos induz à necessidade de diversas fontes para obtenção de um montante significativo de capacidade elétrica instalada (CAMILO et al., 2017).

Embora existam incentivos para o desenvolvimento da geração solar fotovoltaica, esta fonte ainda é inexplorada e subutilizada, destacando que há muito a ser feito para que se consolide na matriz elétrica da região sul do Brasil. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm um grande potencial para auxiliar na diversificação da matriz elétrica brasileira e na redução da dependência dos recursos hidrelétricos, devido às condições naturais favoráveis existentes (DE FARIA JR.; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017). No entanto, são identificadas algumas barreiras que dificultam a sua utilização generalizada, conforme apresentam os

próximos tópicos. Dessa forma, é importante que os estados brasileiros estejam preparados e acumulem experiência com energia solar fotovoltaica para poderem aproveitar ao máximo os benefícios dessa tecnologia (DE LIMA; FERREIRA; MORAIS, 2017; JANNUZZI; DE MELO, 2013).

#### 2.4.2.2 *Barreiras à difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica*

Este tópico descreve as barreiras à adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica que foram identificadas. Os fatores limitantes são agrupados de acordo com as dimensões introduzidas previamente: técnica, econômica, social, gerencial e política. As informações obtidas através das entrevistas são validadas e complementadas por dados provenientes da literatura de energia FV.

##### 2.4.2.2.1 Dimensão técnica

Embora a tecnologia FV tenha avançado significativamente nas últimas décadas (RODRÍGUEZ-URREGO; RODRÍGUEZ-URREGO, 2018), os entrevistados relataram que ainda existem diversas barreiras técnicas à difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica. A sustentabilidade institucional exige padrões técnicos e durabilidade dos sistemas (FERON; HEINRICH; CORDERO, 2016), representando um fator limitante citado pelos entrevistados. Apesar de os módulos fotovoltaicos terem um ciclo de vida relativamente longo, a potência do sistema pode ser significativamente influenciada por fenômenos de degradação que reduzem a eficiência do sistema (RODRIGUES et al., 2016). Para contornar essa barreira, devem ser analisados os materiais passíveis de serem utilizados para o desenvolvimento de células e módulos fotovoltaicos, a fim de escolher aqueles com vida útil mais longa (OBEIDAT, 2018).

Identificou-se que a qualidade dos sistemas fotovoltaicos é fundamental para a adoção dessa tecnologia. Essa qualidade pode ser influenciada não só pelas condições locais do ambiente do usuário, mas também pelos arranjos políticos e financeiros que podem mudar de país para país (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015). Obeidat (2018) afirma que os defeitos de material estão entre as principais causas de falha do dispositivo. Esses defeitos são potencializados pela energia proveniente de campos elétricos elevados, altas densidades de

corrente, aumento da temperatura e tensões nas interfaces da camada de material. Para Dos Santos, Canha e Bernardon (2018), a qualidade dos módulos depende das empresas que trabalham com o sistema fotovoltaico e do cuidado que o adotante tem com os materiais que compõem esse sistema. Além disso, a energia do módulo depende da sua eficiência, potência, número de módulos e recursos solares. Ademais, os usuários finais precisam entender como gerenciar o sistema FV com cuidado, entender suas limitações e evitar danificar os módulos solares e outros materiais componentes, tendo em vista que muitas falhas são causadas pelo consumo excessivo de energia ou negligência do usuário (BROOKS; URMEE, 2014).

Outro fator limitante à difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica na região sul do Brasil refere-se às instalações de sistemas realizadas sem acompanhamento profissional. A falta de conscientização sobre tecnologias avançadas e a mão de obra desqualificada resultam em problemas associados à implementação e manutenção de projetos de energia renovável (MANJU; SAGAR, 2017). Adicionalmente, como essas instalações são realizadas em áreas já conectadas à rede, identificou-se um cenário de irresponsabilidade na operação e manutenção da tecnologia, muitas vezes feita por pessoas inexperientes, uma vez que os clientes têm a opção de utilizar a eletricidade provinda diretamente da rede (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015).

A realização de projetos de P&D isolados, com diferentes focos, foi mencionada pelos entrevistados como uma barreira à difusão fotovoltaica. Essa evidência aponta para a necessidade de implantação de uma estratégia de P&D que se apoie em um planejamento integrado e articule os projetos em andamento. Bosetti et al. (2012) afirmam que a melhor distribuição dos investimentos em P&D no setor fotovoltaico é orientada ao desenvolvimento de tecnologias maduras, como os materiais de silício cristalino e filme fino fotovoltaico, uma vez que têm maior probabilidade de superar gargalos e tornarem-se competitivos em termos de custo.

Outras barreiras técnicas citadas pelos entrevistados são a oscilação da fonte fotovoltaica, a má orientação solar das residências e a arquitetura dos telhados. A exposição solar é requisito básico para o bom funcionamento de sistemas fotovoltaicos, e os módulos expostos ao ambiente externo resultam em uma operação perturbada por condições climáticas variáveis, que podem ocasionar diversos tipos de falhas que afetam sua operação normal e levam a uma considerável perda de energia (BOUTASSETA; RAMDANI; MEKHILEF, 2018). Do ponto de vista das concessionárias, a oscilação da fonte FV é motivo de preocupação, uma

vez que elas não estão preparadas para receber grandes quantidades de geração ou reverter fluxos de energia em circuitos sem ter que fazer reforços ou investir em tecnologias de controle e proteção (DE FARIA JR.; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017).

Além disso, a dimensão arquitetônica das áreas também é um fator importante a ser considerado, pois o desempenho dos coletores solares depende de sua localização e orientação, e os módulos precisam ser inclinados na direção correta para maximizar a exposição solar (ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Uma solução a desafios relacionados a esse tópico é a instalação de sistemas híbridos de geração de energia quando possível, combinando a geração FV com diferentes fontes de energia (por exemplo, aerogeradores de pequeno porte) para aproveitar os potenciais existentes na região da unidade consumidora. No sul do Brasil, a área de cobertura disponível para instalação de sistemas fotovoltaicos corretamente orientados é de 268,27 km<sup>2</sup> (MIRANDA; SZKLO; SCHAEFFER, 2015). Karakaya e Sriwannawit (2015) afirmam que, para áreas urbanas, a superfície para integração de módulos fotovoltaicos nos telhados é muito limitada em construções antigas. No entanto, por meio de políticas públicas, é possível incentivar o planejamento e o *design* de novos edifícios com sistemas fotovoltaicos integrados em sua estrutura para maximizar o espaço de instalação.

#### 2.4.2.2.2 Dimensão econômica

O custo inicial de um sistema fotovoltaico compreende altos valores dos módulos fotovoltaicos, *hardware* de montagem, disjuntores e cabos, além do custo de trabalho, que é um componente importante do custo total da instalação (ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Embora os altos custos de investimento inicial representem o principal obstáculo à implantação em larga escala de sistemas fotovoltaicos, o custo de uma inovação usualmente decresce com o tempo e, neste caso, especificamente no Brasil, os custos de implantação de soluções fotovoltaicas tendem a diminuir anualmente na faixa de 3,3% a 6,5% até 2030 (PINTO; AMARAL; JANISSEK, 2016). De acordo com Tanaka et al. (2017), um preço de varejo mais baixo para sistemas fotovoltaicos pode aumentar a velocidade de os potenciais investidores os adquirirem. Isto é corroborado por Ferreira et al. (2018), que afirmam que os custos associados à geração FV têm sido significativamente reduzidos e essa tendência será mantida ao longo dos anos, levando a um aumento de sua competitividade no futuro.

O longo período de retorno do investimento (*payback*) é uma barreira importante ao uso de sistemas solares. Tendo em vista os altos custos para produção e fornecimento de eletricidade solar fotovoltaica e o baixo consumo anual nas residências, o *payback* do investimento pode ser muito longo, tornando o uso da energia fotovoltaica inviável financeiramente (ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). No entanto, como a expectativa é de que os custos das matérias-primas sejam reduzidos e a produção de sistemas cresça, gerando ganhos de escala, é possível que o período de retorno seja inferior nos próximos anos.

Uma barreira mencionada pelos entrevistados é o fato de a população brasileira ser fortemente dependente de financiamento para a compra de sistemas fotovoltaicos. Apesar de o desenvolvimento de linhas de crédito específicas para a geração de energia solar ser importante para a entrada expressiva dessa fonte na matriz elétrica brasileira, ainda não existem linhas de financiamento com taxas atrativas disponíveis em todos os estados do país (FERREIRA et al., 2018). Condições especiais de financiamento incentivam um número maior de agentes a investir em geração FV, pois permitem um menor dispêndio de capital pelo agente e um maior retorno sobre o investimento de capital. Esta medida de incentivo é viável para a indústria e o comércio, mas é necessário que seja estendida aos clientes residenciais e que a burocracia para obtenção do benefício seja reduzida (DE FARIA JR.; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017). Conforme mencionado por MG1 na entrevista, medidas para aumentar o benefício do financiamento da classe residencial já estão sendo tomadas, aumentando a aplicação da geração fotovoltaica.

O ICMS é outro aspecto econômico limitante à adoção da tecnologia FV, pois compromete o desempenho das indústrias locais e dificulta o avanço de novos negócios. Alguns estados brasileiros já adotaram a política de isenção do ICMS para aumentar a probabilidade de o investimento fotovoltaico se tornar viável (ROCHA et al., 2017). Nesse sentido, é importante que o governo e autoridades do setor elétrico da região sul do Brasil apresentem incentivos e subsídios que contornem essa barreira e viabilizem a adoção da tecnologia, de modo a aproveitarem a vantagem de seu potencial solar, convertendo-a em benefícios para a população (SILVEIRA; TUNA; LAMAS, 2013; VALE et al., 2017). Adicionalmente, as discussões acerca da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) são vistas com preocupação pelos entrevistados, uma vez que consiste em um valor adicional determinado pela ANEEL para efetivar o faturamento mensal dos usuários do sistema de distribuição de energia elétrica, aumentando o custo a ser pago pelos consumidores pela energia excedente injetada na rede de

distribuição (ANEEL, 2012b). Assim, para que os efeitos da TUSD sobre o investimento sejam reduzidos, é interessante que o cliente otimize a sua curva de consumo para que combine o máximo possível com a curva de geração FV. Ou seja, quando houver a possibilidade de utilizar a energia elétrica proveniente da fonte FV durante o dia (período em que há exposição solar e, portanto, geração de eletricidade), é recomendável que o cliente o faça, pois dessa forma haverá menos eletricidade excedente a ser injetada na rede elétrica.

#### 2.4.2.2.3 Dimensão social

O contexto sociocultural determina até que ponto uma tecnologia é adotada e depende da capacidade de a comunidade integrar a geração fotovoltaica às estruturas sociais existentes (FERON; HEINRICHS; CORDERO, 2016). Desse modo, a cultura do consumidor é apontada como uma influência negativa à difusão da tecnologia FV no sul do Brasil, uma vez que a população se sente insegura quanto à confiabilidade desse tipo de geração de eletricidade e é acomodada em receber a eletricidade da rede sem precisar fazer um grande investimento em sistema FV para isso (ABINEE, 2012). Além disso, a cultura das residências e empresas não está notadamente voltada para a preocupação com o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável (ROSA; SILUK; MICHELS, 2016).

A falta de conhecimento adequado acerca da tecnologia fotovoltaica é uma barreira crucial, uma vez que potenciais adotantes se sentem inseguros quanto ao desempenho da tecnologia e carecem de informações relevantes para seus casos individuais (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015). Düşteğör et al. (2018) argumentaram que o medo de experimentar algo novo como consequência de não ter conhecimento suficiente sobre ele é um fator que impede as pessoas de darem um passo em direção à mudança. Desse modo, destaca-se a importância de dedicar esforços para realização de campanhas educativas integradas a níveis local e nacional que visem fornecer informações claras aos consumidores sobre os benefícios ambientais e a segurança das energias renováveis, conscientizando-os sobre os benefícios da tecnologia fotovoltaica. Ainda, Tanaka et al. (2017) ressaltam que pessoas com níveis educacionais mais altos tomam decisões sobre a compra de um sistema FV com base em várias informações, e o contato com especialistas para identificar vantagens e desvantagens das instalações é eficaz para motivá-las a gerarem sua própria energia.

A compra de um sistema fotovoltaico é uma decisão de alto envolvimento, em que usuários em potencial costumam investir tempo e consideração substanciais antes de fazerem uma escolha (JAGER, 2006). Devido à complexidade da decisão, as pessoas acham difícil obter informações completas sobre o assunto, pois existem diversos fatores envolvidos no processo decisório (PALM, 2018). Apesar dos esforços do governo e dos grupos de interesse em microgeração para reduzir essa barreira, a dificuldade em encontrar informações confiáveis sobre o tema é um grande obstáculo à adoção, principalmente para aqueles que consideram a instalação de sistemas fotovoltaicos (BALCOMBE; RIGBY; AZAPAGIC, 2013, 2014).

#### 2.4.2.2.4 Dimensão gerencial

A gestão inadequada pode dificultar o processo de difusão de inovação em uma variedade de contextos. O serviço de pós-vendas fraco ou negligenciado fornecido pelas empresas que instalam sistemas fotovoltaicos é uma importante barreira gerencial à difusão da tecnologia na região sul do Brasil. Conforme mencionado pelos entrevistados, há um grande problema referente à existência de pessoas inexperientes realizando a instalação de sistemas FV, visando somente a venda do produto, sem oferta de serviços de manutenção adequados e confiáveis. Tendo em vista a falta de informações e conhecimentos de grande parte dos adotantes, é necessário um serviço funcional para continuar o monitoramento e a manutenção dos sistemas. Isso representa um desafio para os custos e mão de obra para gerenciar e garantir a sustentabilidade do sistema, e os problemas com o serviço podem prejudicar a qualidade da geração (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015).

Outro aspecto limitante à adoção da tecnologia fotovoltaica está relacionado a publicidades negativas e abordagens de *marketing* ineficazes. Por exemplo, a falta de conhecimento adequado entre os adotantes e os instaladores inexperientes dos sistemas pode resultar em uso inadequado e incapacidade de manter a operação eficiente, podendo criar uma percepção negativa e impedir que clientes em potencial tomem a decisão de adotar os sistemas (D'AGOSTINO; SOVACOOOL; BAMBAWALE, 2011). Islam e Meade (2013) afirmam que a informação e o conhecimento, por meio de abordagens efetivas de *marketing* e campanhas educativas, têm maior probabilidade de acelerar o comportamento de conservação de energia e difusão de tecnologias renováveis.

#### 2.4.2.2.5 Dimensão política

Devido aos altos preços de equipamentos e instalações, os sistemas fotovoltaicos geralmente não são lucrativos sem o apoio de políticas em diversos países. Desse modo, ações governamentais para facilitar o processo de criação de negócios nesse segmento são de vital importância para a rápida difusão dessa inovação (DE FARIA JR.; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017). No entanto, a instabilidade política existente no Brasil, resultante de casos de corrupção por interesses especiais e benefícios sociais e econômicos inadequados, pode levar ao mau desempenho do setor elétrico, decorrente de restrições práticas no prazo para realização de reformas de eletricidade. Como pode ser visto em países como o Nepal (NEPAL; JAMASB, 2012), cujo índice de corrupção devido à instabilidade política é semelhante ao do Brasil (TRANSPARENCY INTERNATIONAL, 2018), qualquer reforma que se estenda para além do tempo de vida do governo torna-se politicamente inviável e adia o progresso da reforma como um todo.

Nos últimos anos, poucas novas políticas ou programas de energia foram criados no Brasil. O programa que engloba fontes de energia solar e eólica é visto pelo mercado como burocrático, superficial e hostil à implantação de novas tecnologias (PINTO; AMARAL; JANISSEK, 2016). Keeley e Matsumoto (2018) esclarecem a importância de um forte apoio político nos níveis nacional, regional ou local, através de procedimentos de aplicação burocráticos suavizados, estabelecimento de metas e planejamento do desenvolvimento, a fim de que a geração distribuída de energia fotovoltaica seja difundida mais rapidamente.

Tendo em vista os elevados preços dos sistemas fotovoltaicos, são necessários mecanismos de incentivo para que sejam utilizados em larga escala. A alta produção desses equipamentos no Brasil seria um grande avanço para o setor fotovoltaico, mas isso requer medidas políticas para que seja possível competir com outros países em igualdade de condições. A isenção de impostos e empréstimos reduzidos são incentivos que devem ser ajustados nos níveis federal e estadual para promover a adoção de sistemas solares (DE FARIA JR.; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017). Para Dias et al. (2017), embora o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) ofereça opções de financiamento atraentes para grandes empresas, não beneficia os pequenos consumidores. Dessa forma, o governo poderia promover um incentivo maior à microgeração FV, para que as pessoas percebam vantagem financeira e os benefícios da tecnologia.

A falta de regras bem definidas para implantação dos sistemas fotovoltaicos se mostrou outra barreira à difusão da tecnologia na região sul-brasileira. Esse fator aponta para a necessidade de estratégias e planos políticos para o desenvolvimento do setor de energias renováveis, estabelecendo diretrizes claras para o planejamento, desenvolvimento e execução de um projeto de geração distribuída de energia FV (BOSETTI et al., 2012). Esse tópico vem sendo debatido no Parlamento com a proposta da criação de um Marco Legal da Mini e Micro Geração Distribuída, que visa proporcionar maior segurança jurídica e estabilidade regulatória, elevando o Brasil a um novo patamar de sustentabilidade, competitividade e inovação. Cucchiella, D'Adamo e Koh (2015) afirmam ainda que é necessário um plano bem definido para quantificar os benefícios da implementação de sistemas FV, incluindo os benefícios econômicos e ambientais decorrentes do alcance de metas estabelecidas por um programa dedicado à energia solar.

Para a geração de energia elétrica na configuração de micro e mini geração distribuída, são necessários módulos fotovoltaicos e demais componentes para balanceamento do sistema FV. No entanto, como a produção nacional ainda não é suficiente para o mercado, esses componentes normalmente são importados da China, representando um fator limitante à maior adoção da tecnologia fotovoltaica. Estrategicamente, os formuladores de políticas dos governos estaduais e federal devem buscar formas de incentivo à produção local dos componentes essenciais ao sistema fotovoltaico a fim de que o país obtenha independência das tecnologias importadas e incorpore em seu mercado todo o ciclo de produção, pesquisa e experiência pessoal (CAMILO et al., 2017). Esta informação é corroborada por Ferreira et al. (2018), que afirmam que o desenvolvimento do mercado interno permite que o país participe de algum estágio da cadeia de valor de uma indústria de alto valor agregado no mundo. Além disso, o Brasil possui matérias-primas e indústrias que podem ser adaptadas para a produção de componentes para sistemas fotovoltaicos. Assim, o fortalecimento da indústria local pode reduzir custos e aumentar a participação dessa fonte de energia na matriz elétrica nacional.

Embora o mercado internacional de componentes fotovoltaicos seja extremamente competitivo (FERREIRA et al., 2018), Carstens e Cunha (2019) afirmam que o Brasil tem potencial para desenvolver toda a cadeia produtiva por meio de políticas governamentais, iniciativas tecno-econômicas, atividade de mercado aberto e competitivo e desenvolvimento da indústria nacional com adaptação tecnológica para atender às condições do país. Mesmo que a China represente o centro da fabricação global de componentes fotovoltaicos, as características

interconectadas da indústria devem ser dialeticamente identificadas como cooperação e competição. O Brasil é favorecido pela pesquisa internacional e desenvolvimento de módulos solares, e sua indústria começará inicialmente como um elemento de uma cadeia transnacional de produção de energia fotovoltaica. Ao superar obstáculos fiscais e custos de produção relativamente mais altos, o Brasil pode não estar mais subordinado e dependente de circuitos fotovoltaicos globais para se tornar um local estratégico e potencialmente competitivo (DE SOUZA; CAVALCANTE, 2016).

A Resolução Normativa (REN) nº 482/2012, publicada pela ANEEL, estabelece as condições gerais para o acesso à micro e mini geração distribuída e regulamenta a sua medição líquida. Ademais, define que um sistema de compensação de energia elétrica permite que os proprietários de micro e mini geração recebam créditos pela energia ativa gerada além do consumo do usuário. Esses créditos têm validade de 60 meses após a data de faturamento e não há pagamento pela energia injetada na rede de distribuição (ANEEL, 2012a). No entanto, esse incentivo não é forte o suficiente para impulsionar a geração distribuída de energia fotovoltaica, representando um fator limitante à sua adoção. Dessa forma, uma medida para contornar esse problema é a criação de uma resolução complementar que corrija as falhas percebidas. Nesse sentido, a ANEEL vem trabalhando na revisão da REN 482/2012, propondo a alteração de itens como o custo de disponibilidade de energia elétrica, valor de compensação, dentre outros.

Com base nos resultados acima mencionados das observações e fatores que comprometem a maior difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica, os achados estão sumarizados na Tabela 2. Esta tabela apresenta um resumo dos resultados analisados e mostra as barreiras identificadas e as medidas para superá-las dentro de cada uma das dimensões estudadas: técnica, econômica, social, gerencial e política.

Tabela 2 - Barreiras à adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica e medidas para superá-las

(continua)

| <b>Dimensão</b> | <b>Barreiras à geração distribuída de energia fotovoltaica</b>   | <b>Medidas para superar as barreiras</b>  |
|-----------------|--|---|
| Técnica         | Baixa durabilidade do sistema fotovoltaico                       | Os materiais que podem ser usados para o desenvolvimento de células e módulos fotovoltaicos devem ser analisados para que sejam escolhidos aqueles com prazo de validade mais longo |
|                 | Má qualidade do sistema fotovoltaico                             | Incentivo à cooperação entre empresas, universidade e governo para desenvolvimento de materiais e sistemas fotovoltaicos de qualidade   |
|                 | Instalações sem suporte profissional                             | Realização de auditorias por um órgão de fiscalização   |
|                 | Implementação de projetos de P&D isolados com diferentes focos   | Implantação de estratégia de P&D baseada no planejamento integrado e articulação de projetos em andamento   |
|                 | Natureza oscilante da fonte fotovoltaica                         | As concessionárias devem investir no controle e proteção da rede para receber maiores quantidades de geração ou reverter os fluxos de energia nos circuitos                         |
|                 | Má orientação solar das casas e arquitetura do telhado           | Instalação de sistemas híbridos de geração de energia, combinando outra fonte de energia com geração fotovoltaica distribuída   |
| Econômica       | Alto custo de materiais e instalação                             | O menor preço de varejo dos sistemas fotovoltaicos pode aumentar a velocidade de os potenciais investidores os adquirirem   |
|                 | Longo período de retorno do investimento                         | Redução dos custos de matérias-primas, aumento da produção de sistemas e busca por soluções de armazenamento da energia gerada  |
|                 | Dependência de financiamento para compra do sistema fotovoltaico | Condições especiais de financiamento devem ser criadas para que os clientes residenciais aumentem a geração fotovoltaica  |
|                 | Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS)        | O governo e autoridades do setor elétrico do sul do Brasil devem apresentar incentivos e subsídios que permitam a adoção da tecnologia fotovoltaica, como a isenção do ICMS         |
|                 | Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD)                  | Otimização da curva de consumo do cliente para combinar o máximo possível com a curva de geração fotovoltaica   |

Tabela 2 - Barreiras à adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica e medidas para superá-las

(conclusão)

|           |   |   |
|-----------|---|---|
| Social    | Cultura do consumidor fracamente envolvida com sistemas fotovoltaicos                                   | Realização de campanhas educativas para fornecer informações claras aos consumidores sobre os benefícios da energia solar fotovoltaica  |
|           | Falta de conhecimento sobre a tecnologia fotovoltaica   |   |
| Gerencial | Serviço de pós-vendas fraco ou negligenciado fornecido por empresas que instalam sistemas fotovoltaicos | As empresas devem fornecer um serviço funcional para manutenção e monitoramento contínuos dos sistemas fotovoltaicos  |
|           | Abordagens de marketing ineficazes e publicidade negativa   | Criação de abordagens de marketing eficazes e campanhas educativas para transmitir informações e conhecimentos sobre sistemas fotovoltaicos   |
| Política  | Instabilidade política  | Proposição de legislação que perpetue o apoio e incentivo à geração fotovoltaica independente da administração governamental  |
|           | Burocracia excessiva  | Redução da burocracia para que a implantação de sistemas fotovoltaicos seja difundida mais rapidamente  |
|           | Falta de políticas de incentivo à geração fotovoltaica  | O governo deve promover incentivos para o setor fotovoltaico nos níveis federal e estadual, como isenções fiscais e empréstimos reduzidos   |
|           | Falta de regras bem definidas para a implementação de sistemas fotovoltaicos                            | Criação de estratégias e planos de políticas para o desenvolvimento do setor de energias renováveis, estabelecendo diretrizes claras para o planejamento, desenvolvimento e execução de projetos fotovoltaicos        |
|           | Dependência da importação de componentes fotovoltaicos  | Os formuladores de políticas dos governos federal e estadual devem incentivar a produção local de componentes essenciais do sistema fotovoltaico para que o país possa obter independência das tecnologias importadas |
|           | Deficiência nos sistemas de compensação de energia  | Criação de resolução complementar para corrigir a deficiência nos sistemas de compensação de energia  |

Com base na revisão bibliográfica da geração distribuída de energia fotovoltaica e no estudo qualitativo conduzido com profissionais de concessionárias de energia elétrica, associações de empresas fotovoltaicas, empreendedores, formuladores de políticas, pesquisador acadêmico e usuário de sistema FV, foi possível verificar que as barreiras são evidentes para economias emergentes como Brasil, Bangladesh e Nepal, bem como para países desenvolvidos como Alemanha, Estados Unidos e China (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015). Embora as barreiras devam ser avaliadas em um contexto particular, em relação a um país ou região semelhante, elas geralmente são englobadas em cinco dimensões inter-relacionadas: técnica, econômica, social, gerencial e política. O Brasil, comparado aos países europeus e asiáticos com maior capacidade instalada, apresenta grandes obstáculos à adoção da tecnologia FV, pois ainda é incipiente na cultura de implantação de sistemas de energia solar (TIEPOLO et al., 2014). Esse fato aponta para a necessidade de criar programas específicos para incentivar a pesquisa e o desenvolvimento dessa importante fonte de energia renovável, diversificando a matriz elétrica nacional e reduzindo os impactos ambientais.

## 2.5 CONCLUSÕES

Embora muitos estudos afirmem que os sistemas fotovoltaicos estão se desenvolvendo suficientemente para competir com outras fontes de energia convencionais (KABIR et al., 2018; SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017), este capítulo mostrou que ainda existem várias barreiras que dificultam a maior adoção e difusão dessa tecnologia. Baseada em uma abordagem qualitativa, essa etapa da pesquisa investigou o crescimento do setor FV na região sul do Brasil e os fatores limitantes à sua expansão. O estudo foi desenvolvido por meio de entrevistas semiestruturadas realizadas com profissionais de grandes e pequenas concessionárias de serviços de distribuição de energia elétrica, responsável por uma associação de empresas e cadeias produtivas do setor, pesquisador acadêmico, cliente, fornecedor de sistemas de energia fotovoltaica, membro do governo e consultor na área de energia da região. Assim, para a geração distribuída fotovoltaica, a presente pesquisa confirma um padrão existente, uma vez que várias barreiras mencionadas pelos entrevistados foram identificadas por diversos estudos em todo o mundo e especificamente no Brasil. Suplementarmente, fornece novas ideias estruturadas sobre a evolução da participação da geração distribuída de energia FV na matriz elétrica da região em estudo e apresenta expectativas de crescimento futuro, discutindo e estruturando os fatores

determinantes para a adoção da tecnologia nas dimensões técnica, econômica, social, gerencial e política.

Através de informações obtidas com os entrevistados e na literatura, foi possível verificar que há expectativa de crescimento da geração distribuída de energia fotovoltaica na região sul do Brasil. Em 2020, o número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede correspondeu a aproximadamente 1,5% de todas as fontes de geração distribuída, representando um aumento expressivo em relação a 2013. De acordo com a linha de tendência, espera-se que em 2024 a capacidade instalada alcance 1810,5 MWp (Mega Watt Pico), o que representaria 5,1% de toda a eletricidade gerada. Esses são números pequenos e claramente ainda há muito a ser feito para que a energia fotovoltaica se desenvolva e se consolide na matriz elétrica da região sul-brasileira. No entanto, para modificar a linha de tendência, é necessário compreender os principais fatores que limitam a adoção da tecnologia fotovoltaica e elaborar um plano estratégico em conjunto com os governos estaduais e federal orientado a superar as barreiras e auxiliar no crescimento dessa tecnologia de energia sustentável.

Do ponto de vista técnico, as principais preocupações correspondem à durabilidade e à qualidade dos sistemas fotovoltaicos, uma vez que os materiais estão sujeitos a fenômenos de degradação, que reduzem a eficiência do sistema. Na dimensão econômica, o custo do investimento inicial é geralmente percebido como elevado e representa o principal obstáculo à implantação de sistemas FV em grande escala. Além disso, o acesso da população sul-brasileira ao financiamento para a compra de sistemas FV é apontado como outro fator limitante à difusão da tecnologia, necessitando de incentivos especiais para impulsionar a geração fotovoltaica. No contexto social, a cultura dos consumidores e a falta de conhecimento adequado acerca tecnologia FV se apresentam como barreiras cruciais, indicando a importância da realização de campanhas educativas que forneçam informações sobre os benefícios dessa fonte renovável. Do ponto de vista gerencial, há problemas relacionados aos serviços de pós-vendas ineficientes e à publicidade negativa decorrente da falta de experiência dos instaladores dos sistemas. Na dimensão política, destacam-se a dependência das importações de componentes FV, a instabilidade política existente no Brasil e a falta de mecanismos e incentivos atraentes para os consumidores, apontando para a necessidade de o governo definir planos para o desenvolvimento do setor de energias renováveis.

Os resultados indicam a necessidade de criar um ambiente colaborativo, com o envolvimento de empresas do setor fotovoltaico, governo, instituições financeiras,

pesquisadores e comunidade. Essa colaboração é necessária para superar as barreiras existentes, permitindo que a geração distribuída de energia fotovoltaica se consolide ainda mais no sul do Brasil. Isso pode reduzir os impactos ambientais associados às mudanças climáticas e à dependência de combustíveis fósseis, ao passo que são aproveitadas as condições favoráveis à captação de energia solar no país. É importante ressaltar que esta etapa do estudo foi conduzida no sul do Brasil, mas acredita-se que muitas das conclusões são relevantes para as demais regiões brasileiras, países subdesenvolvidos ou para regiões de países desenvolvidos onde a presença de sistemas FV ainda é incipiente.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [números de concessão 142448/2018-4, 308723/2017-1, 311926/2017-7 e 465640/2014-1], Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) [número de concessão 23038.000776/2017-54] e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) [número de concessão 17/2551-0000517-1]. Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPERGS e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Geração Distribuída (INCT-GD) por apoiarem esta pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa ANEEL Nº 482, de 17 de Abril de 2012**. Brasil, 2012a. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa ANEEL Nº 479, de 3 de Abril de 2012**. Brasil, 2012b. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012479.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa ANEEL Nº 622, de 19 de Agosto de 2014**. Brasil, 2014. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2014622.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Geração Distribuída**. 2021. Disponível em:

<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjVlLTllMjItN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSI0ImMiOjR9>>. Acesso em: 25 out. 2021.

AIKENHEAD, G. et al. Application of process mapping and causal loop diagramming to enhance engagement in pollution prevention in small to medium size enterprises: Case study of a dairy processing facility. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 275–284, 2015.

AMARAL, Agnes Bess Alcantara et al. Solar energy and distributed generation: 2015, a year of inflection in Brazil? **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 8, p. 3731–3737, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. Brasil, 2012. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

BALCOMBE, P.; RIGBY, D.; AZAPAGIC, A. Motivations and barriers associated with adopting microgeneration energy technologies in the UK. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 655–666, 2013.

BALCOMBE, P.; RIGBY, D.; AZAPAGIC, A. Investigating the importance of motivations and barriers related to microgeneration uptake in the UK. **Applied Energy**, v. 130, p. 403–418, 2014.

BOSETTI, V. et al. The future prospect of PV and CSP solar technologies: An expert elicitation survey. **Energy Policy**, v. 49, p. 308–317, 2012.

BOUTASSETA, N.; RAMDANI, M.; MEKHILEF, S. Fault-tolerant power extraction strategy for photovoltaic energy systems. **Solar Energy**, v. 169, p. 594–606, 2018.

BROOKS, C.; URMEE, T. Importance of individual capacity building for successful solar program implementation: A case study in the Philippines. **Renewable Energy**, v. 71, p. 176–184, 2014.

CÂMARA DOS DEPUTADOS DO BRASIL. **Lei Complementar nº 87, de 13 de setembro de 1996**. Brasil, 1996. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/lcp/Lcp87.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/Lcp87.htm)>. Acesso em: 8 jun. 2018.

CAMILO, H. F. et al. Assessment of photovoltaic distributed generation – Issues of grid connected systems through the consumer side applied to a case study of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 712–719, 2017.

CARSTENS, D. D. S.; CUNHA, S. K. Challenges and opportunities for the growth of solar

- photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, v. 125, p. 396–404, 2019.
- CHO, Y.; KOO, Y. Investigation of the effect of secondary market on the diffusion of innovation. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 79, p. 1362–1371, 2012.
- CORAM, A.; KATZNER, D. W. Reducing fossil-fuel emissions: Dynamic paths for alternative energy-producing technologies. **Energy Economics**, v. 70, p. 179–189, 2018.
- CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; KOH, S. C. L. Environmental and economic analysis of building integrated photovoltaic systems in Italian regions. **Journal of Cleaner Production**, v. 98, p. 241–252, 2015.
- CURTIUS, H. C. The adoption of building-integrated photovoltaics: barriers and facilitators. **Renewable Energy**, v. 126, p. 783-790, 2018.
- D'AGOSTINO, A. L.; SOVACOO, B. K.; BAMBAWALE, M. J. And then what happened? A retrospective appraisal of China's Renewable Energy Development Project (REDP). **Renewable Energy**, v. 36, p. 3154–3165, 2011.
- DE FARIA JR., H.; TRIGOSO, F. B. M.; CAVALCANTI, J. A. M. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 469–475, 2017.
- DE LIMA, L. C.; FERREIRA, L. A.; MORAIS, F. H. B. L.. Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 37, p. 79–85, 2017.
- DE SOUZA, L. E. V.; CAVALCANTE, A. M. G. Towards a sociology of energy and globalization: Interconnectedness, capital, and knowledge in the Brazilian solar photovoltaic industry. **Energy Research and Social Science**, v. 21, p. 145–154, 2016.
- DEVABHAKTUNI, V. et al. Solar energy: Trends and enabling technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 555–564, 2013.
- DIAS, C. L. A. et al. Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. **Renewable Energy**, v. 114, p. 367–375, 2017.
- DINIZ, A. S. A. C. et al. Review of the photovoltaic energy program in the state of Minas Gerais, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 2696–2706, 2011.
- DOS SANTOS, L. L. C.; CANHA, L. N.; BERNARDON, D. P. Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. **Renewable Energy**, v. 116, p. 384–401, 2018.
- DÜŞTEGÖR, D. et al. A smarter electricity grid for the Eastern Province of Saudi Arabia:

Perceptions and policy implications. **Utilities Policy**, v. 50, p. 26–39, 2018.

ECHEGARAY, F. Understanding *stakeholders'* views and support for solar energy in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 63, p. 125–133, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016: ano base 2015**. Brasil, 2016b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-en/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202016.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018: ano base 2017**. Brasil, 2018a. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional: ano base 2013**. Brasil, 2014. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2014.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional: ano base 2014**. Brasil, 2015. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-127/topico-97/Relatório\\_Final\\_2015.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-127/topico-97/Relatório_Final_2015.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional: ano base 2015**. Brasil, 2016c. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-94/Relatório\\_Final\\_2016.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-94/Relatório_Final_2016.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional: ano base 2016**. Brasil, 2017. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-82/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2017.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-82/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional: ano base 2017**. Brasil, 2018b. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018\\_\\_Int.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional: ano base 2018**. Brasil, 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional: ano base 2019**. Brasil, 2020. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf)>. Acesso em: 13 ago. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional: ano base 2020**. Brasil, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica DEA 13/15 Demanda de Energia - 2050**. Brasil, 2016a. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-458/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

FERON, S.; HEINRICHS, H.; CORDERO, R. R. Sustainability of rural electrification programs based on off-grid photovoltaic (PV) systems in Chile. **Energy, Sustainability and Society**, v. 6, n. 1, p. 32, 2016.

FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181–191, 2018.

FRAMBACH, R. T.; SCHILLEWAERT, N. Organizational innovation adoption: A multi-level framework of determinants and opportunities for future research. **Journal of Business Research**, v. 55, n. 2, p. 163–176, 2002.

FRATE, C. A.; BRANNSTROM, C. *Stakeholder* subjectivities regarding barriers and drivers to the introduction of utility-scale solar photovoltaic power in Brazil. **Energy Policy**, v. 111, p. 346–352, 2017.

FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146-157, 2019.

GUERRA, J. B. S. O. A. et al. Future scenarios and trends in energy generation in Brazil: Supply and demand and mitigation forecasts. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 197–

210, 2015.

HOSSAIN, M. F.; HOSSAIN, S.; UDDIN, M. J. Renewable energy: Prospects and trends in Bangladesh. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 44–49, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados**. Brasil, 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>>. Acesso em: 13 jun. 2018.

ISLAM, T. Household level innovation diffusion model of photo-voltaic (PV) solar cells from stated preference data. **Energy Policy**, v. 65, p. 340–350, 2014.

ISLAM, T.; MEADE, N. The impact of attribute preferences on adoption timing: The case of photo-voltaic (PV) solar cells for household electricity generation. **Energy Policy**, v. 55, p. 521–530, 2013.

JAGER, W. Stimulating the diffusion of photovoltaic systems: A behavioural perspective. **Energy Policy**, v. 34, p. 1935–1943, 2006.

JANNUZZI, G. M.; DE MELO, C. A. Grid-connected photovoltaic in Brazil: Policies and potential impacts for 2030. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, p. 40–46, 2013.

KABIR, E. et al. Solar energy: Potential and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 894–900, 2018.

KARAKAYA, E.; SRIWANNAWIT, P. Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 60–66, 2015.

KASSENGA, G. R. The status and constraints of solar photovoltaic energy development in Tanzania. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy**, v. 3, n. 4, p. 420–432, 2008.

KEELEY, A. R.; MATSUMOTO, K. Investors' perspective on determinants of foreign direct investment in wind and solar energy in developing economies – Review and expert opinions. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 132–142, 2018.

LACERDA, J. S.; VAN DEN BERGH, J. C. J. M. Diversity in solar photovoltaic energy: Implications for innovation and policy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 331–340, 2016.

MANJU, S.; SAGAR, N. Progressing towards the development of sustainable energy: A critical review on the current status, applications, developmental barriers and prospects of solar photovoltaic systems in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 293–313, 2017.

- MARTINS, F. R. et al. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. **Energy Policy**, v. 36, n. 8, p. 2865–2877, 2008.
- MIRANDA, R. F. C.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Technical-economic potential of PV systems on Brazilian rooftops. **Renewable Energy**, v. 75, p. 694–713, 2015.
- NEPAL, R.; JAMASB, T. Reforming small electricity systems under political instability: The case of Nepal. **Energy Policy**, v. 40, p. 242–251, 2012.
- OBEIDAT, F. A comprehensive review of future photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 163, p. 545–551, 2018.
- ORIOLO, A.; DI GANGI, A. Review of the energy and economic parameters involved in the effectiveness of grid-connected PV systems installed in multi-storey buildings. **Applied Energy**, v. 113, p. 955–969, 2014.
- PALM, J. Household installation of solar panels – Motives and barriers in a 10-year perspective. **Energy Policy**, v. 113, p. 1–8, 2018.
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. Brasil, 2017. Disponível em: <[http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas\\_Brasileiro\\_Energia\\_Solar\\_2a\\_Edicao.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf)>. Acesso em: 22 jun. 2018.
- PERES, R.; MULLER, E.; MAHAJAN, V. Innovation diffusion and new product growth models: A critical review and research directions. **International Journal of Research in Marketing**, v. 27, p. 91–106, 2010.
- PINTO, J. T. M.; AMARAL, K. J.; JANISSEK, P. R. Deployment of photovoltaics in Brazil: Scenarios, perspectives and policies for low-income housing. **Solar Energy**, v. 133, p. 73–84, 2016.
- PONSIOEN, T. C.; VIEIRA, M. D. M.; GOEDKOOOP, M. J. Surplus cost as a life cycle impact indicator for fossil resource scarcity. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 4, p. 872–881, 2014.
- REDISKE, G. et al. Determinant factors in site selection for photovoltaic projects: A systematic review. **International Journal of Energy Research**, v. 43, n. 5, p. 1689–1701, 2018.
- ROCHA, L. C. S. et al. Photovoltaic electricity production in Brazil: A stochastic economic viability analysis for small systems in the face of net metering and tax incentives. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 1448–1462, 2017.
- RODRIGUES, S. et al. Economic feasibility analysis of small scale PV systems in different countries. **Solar Energy**, v. 131, p. 81–95, 2016.

- RODRÍGUEZ-URREGO, D.; RODRÍGUEZ-URREGO, L. Photovoltaic energy in Colombia: Current status, inventory, policies and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 160–170, 2018.
- ROSA, C. B.; SILUK, J. C. M.; MICHELS, L. Proposal of the Instrument for Measuring Innovation in the Generation Photovoltaics. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 11, p. 4534–4539, 2016.
- SAHOO, S. K. Renewable and sustainable energy reviews solar photovoltaic energy progress in India: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 927–939, 2016.
- SAIKKU, L. et al. Diffusion of solar electricity in the network of private actors as a strategic experiment to mitigate climate change. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2730–2740, 2017.
- SAMPAIO, P. G. V; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590–601, 2017.
- SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. Q. The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 133–141, 2013.
- SÜSSER, D.; KANNEN, A. ‘Renewables? Yes, please!’: perceptions and assessment of community transition induced by renewable-energy projects in North Frisia. **Sustainability Science**, v. 12, n. 4, p. 563–578, 2017.
- TANAKA, K. et al. Decision-making governance for purchases of solar photovoltaic systems in Japan. **Energy Policy**, v. 111, p. 75–84, 2017.
- TIEPOLO, G. M. et al. Photovoltaic generation potential of paran state, Brazil - A comparative analysis with European countries. **Energy Procedia**, v. 57, p. 725–734, 2014.
- TRANSPARENCY INTERNATIONAL. **Corruptions perceptions index 2018**. Disponível em: <<https://www.transparency.org/cpi2018>>. Acesso em: 12 ago. 2018.
- VALE, A. M. et al. Analysis of the economic viability of a photovoltaic generation project applied to the Brazilian housing program “Minha Casa Minha Vida”. **Energy Policy**, v. 108, p. 292–298, 2017.
- VIANA, M. S.; MANASSERO, G.; UDAETA, M. E. M. Analysis of demand response and photovoltaic distributed generation as resources for power utility planning. **Applied Energy**, v. 217, p. 456–466, 2018.
- ZHAI, P.; WILLIAMS, E. D. Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using

fuzzy logic model. **Renewable Energy**, v. 41, p. 350–357, 2012.

ZHANG, X.; SHEN, L.; CHAN, S. Y. The diffusion of solar energy use in HK: What are the barriers? **Energy Policy**, v. 41, p. 241–249, 2012.

ZOU, H. et al. Market dynamics, innovation, and transition in China's solar photovoltaic (PV) industry: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 197–206, 2017.

## **APÊNDICE A.1 – QUESTIONÁRIO PARA ASSOCIAÇÕES E EMPREENDEDORES NO SETOR DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

### *1. Panorama da geração distribuída fotovoltaica no estado da organização*

- 1.1. A energia fotovoltaica corresponde a qual parte da geração distribuída no estado? Qual é a capacidade instalada desse tipo de energia hoje?
- 1.2. Qual é a expectativa da organização em relação à geração de energia fotovoltaica para os próximos anos?
- 1.3. Quais fatores limitam a maior adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica?
- 1.4. Como ocorre o sistema de compensação da concessionária para unidades geradoras residenciais, comerciais e industriais pela energia elétrica excedente inserida na rede por meio de geração distribuída?
- 1.5. A partir de que consumo em kWh torna-se viável a instalação de módulos fotovoltaicos em unidades residenciais, comerciais e industriais?
- 1.6. Qual é o custo da implantação de um kit fotovoltaico em unidades residenciais, comerciais e industriais?
- 1.7. Como evoluiu o custo da implantação de kits fotovoltaicos?
- 1.8. Qual é a previsão de redução do custo de implementação nos próximos anos?
- 1.9. No setor fotovoltaico, para quais projetos são destinados os maiores investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação?

### *2. Identificação*

- 2.1. Nome da organização
- 2.2. Estado em que a organização está localizada
- 2.3. Papel do respondente na organização
- 2.4. Há quanto tempo você trabalha na organização?

## **APÊNDICE A.2 – QUESTIONÁRIO PARA CONCESSIONÁRIAS E COOPERATIVAS DE GERAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DA REGIÃO SUL DO BRASIL**

### *1. Panorama da matriz elétrica do estado de abrangência da organização*

- 1.1. Qual é a composição da matriz elétrica do estado?
- 1.2. Qual é a taxa de crescimento anual do consumo de energia do estado?
- 1.3. Há previsão de crescimento para alguma fonte específica de geração de energia? Se sim, qual é a fonte e por quê?
- 1.4. Por que pode haver instabilidade na energia que o consumidor recebe da rede?
- 1.5. A geração distribuída poderia ser uma solução para diminuir a instabilidade da distribuição de energia?
- 1.6. Atualmente, qual é a principal fonte de geração distribuída de energia no estado?
- 1.7. Para quais projetos de energia estão destinados os maiores investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação da organização?

### *2. Panorama da geração de energia fotovoltaica no estado da organização*

- 2.1. A energia fotovoltaica corresponde a qual parte da geração distribuída no estado? Qual é a capacidade instalada desse tipo de energia hoje?
- 2.2. Qual é a expectativa da organização em relação à geração de energia fotovoltaica para os próximos anos?
- 2.3. Quais fatores limitam a maior adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica?
- 2.4. Como ocorre o sistema de compensação da concessionária para unidades geradoras residenciais, comerciais e industriais pela energia elétrica excedente inserida na rede por meio de geração distribuída?

### *3. Identificação*

- 3.1. Nome da organização
- 3.2. Estado em que a organização está localizada
- 3.3. Papel do respondente na organização
- 3.4. Há quanto tempo você trabalha na organização?

**APÊNDICE A.3 – QUESTIONÁRIO PARA CLIENTE QUE INSTALOU SISTEMA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

*1. Panorama da geração distribuída fotovoltaica*

- 1.1. Há quanto tempo você adquiriu o sistema fotovoltaico?
- 1.2. O que o motivou a instalar o sistema?
- 1.3. Você está satisfeito com o sistema instalado?
- 1.4. Qual é a sua expectativa em relação à geração de energia fotovoltaica para os próximos anos?
- 1.5. Quais fatores limitam a maior adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica?

*2. Identificação*

- 2.1. Nome
- 2.2. Estado em que o sistema está instalado

**APÊNDICE A.4 – QUESTIONÁRIO PARA MEMBRO DO GOVERNO DA REGIÃO SUL DO BRASIL***1. Panorama da geração distribuída fotovoltaica na região sul do Brasil*

- 1.1. Qual é a sua expectativa em relação à geração de energia fotovoltaica para os próximos anos?
- 1.2. Quais políticas incentivam e regulam o setor de energia fotovoltaica na região?
- 1.3. Existe algum financiamento para incentivar a adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica?
- 1.4. Existe algum estudo estratégico que traga informações para ajudar na expansão do setor fotovoltaico?

*2. Identificação*

- 2.1. Nome
- 2.2. Papel do entrevistado no governo
- 2.3. Há quanto tempo você trabalha no governo?

**APÊNDICE A.5 – QUESTIONÁRIO PARA FORNECEDOR DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, PESQUISADOR ACADÊMICO E CONSULTOR ESTRATÉGICO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

*1. Panorama da geração distribuída fotovoltaica na região sul do Brasil*

- 1.1. Qual é a sua expectativa em relação à geração de energia fotovoltaica para os próximos anos?
- 1.2. Quais fatores limitam a maior adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica?
- 1.3. Como essas barreiras podem ser superadas?
- 1.4. Qual é a maior motivação dos clientes para instalar o sistema?
- 1.5. No setor fotovoltaico, para quais projetos são destinados os maiores investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação?
- 1.6. Como as universidades e as empresas podem promover o desenvolvimento do setor fotovoltaico?
- 1.7. Existe algum programa que incentive a adoção de tecnologia fotovoltaica na região sul do Brasil?

*2. Identificação*

- 2.1. Nome
- 2.2. Papel do respondente na organização
- 2.3. Há quanto tempo você trabalha no setor?

### 3 ARTIGO 2 - Cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e fatores para sua competitividade: uma revisão sistemática

Taís Bisognin Garlet

José Luis Duarte Ribeiro

Fernando de Souza Savian

Julio Cezar Mairesse Siluk

Uma versão em inglês similar a este artigo foi publicada em 05/10/2020 no periódico *Solar Energy* (Qualis A2; Fator de Impacto JCR 2020: 5.742; Percentil Scopus: 87%).

**Resumo:** Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede consistem em uma tecnologia renovável crescente na matriz elétrica mundial. No entanto, para que a competitividade e difusão dessa tecnologia sejam impulsionadas, é necessário integrar diferentes atores da cadeia de valor fotovoltaica em um ambiente colaborativo para superar barreiras técnicas, econômicas, gerenciais, políticas e mercadológicas. Assim, o objetivo deste capítulo da tese é identificar os elos que compõem a cadeia de valor do setor e os principais fatores que influenciam a competitividade e a adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica. Para isso, uma revisão sistemática da literatura foi conduzida utilizando o protocolo de revisão *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*, resultando em 94 estudos distribuídos entre 1989 e 2019. As conclusões apontam que os atores da cadeia de valor e os fatores que influenciam a competitividade do setor concentram-se em diversas esferas, apresentando relações de dependência estabelecidas nos segmentos *upstream*, *midstream*, *downstream* e cadeia auxiliar. A cadeia de valor desenvolvida apresenta de modo singular a compilação das interações entre os diferentes atores. Além disso, são discutidos os fatores que tornam a tecnologia fotovoltaica competitiva, auxiliando governo, investidores, empresas, concessionárias de energia elétrica e consumidores a ampliarem a difusão dessa fonte de energia renovável e contribuírem para os desenvolvimentos econômico, ambiental e social.

**Palavras-chave:** Energia Fotovoltaica; Geração Distribuída; Cadeia de Valor; Competitividade; Revisão Sistemática; Adoção Fotovoltaica.

**Abreviações:**

FIT: *Feed-In Tariff*

FV: Fotovoltaico

P&D: Pesquisa e Desenvolvimento

PIB: Produto Interno Bruto

PRISMA: *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyzes*

### 3.1 INTRODUÇÃO

As economias em desenvolvimento enfrentam um difícil desafio, que consiste em atender ao aumento do consumo de energia elétrica ao mesmo tempo em que o impacto do uso de fontes não renováveis deve ser reduzido (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017). Assim, há um incentivo para desenvolver rapidamente novas fontes de energia por meio de políticas relevantes, tendo em vista o amadurecimento das tecnologias de geração de energia renovável (LIU; LIN, 2019). A energia solar fotovoltaica (FV) é considerada um dos mercados mais favoráveis no campo das energias renováveis para reduzir as desvantagens da queima de combustíveis fósseis, uma vez que tem perspectivas de rápido crescimento e elevados níveis de investimento já realizados (NĂSTASE et al., 2018)

Existem vários usos da tecnologia de energia fotovoltaica a médio e longo prazos, envolvendo pequenos sistemas conectados à rede por meio de geração distribuída e usinas de grande escala (FERREIRA et al., 2018; REDISKE et al., 2019). De acordo com Ferreira et al. (2018) e R  ther e Zilles (2011), os sistemas FV, especialmente aqueles conectados ao sistema de distribui  o, oferecem diversos benefícios ao sistema elétrico, como a redu  o de perdas por transmissão e distribui  o de energia, a redu  o do investimento em linhas de transmissão e distribui  o e o aumento no volume de eletricidade disponível nos momentos de pico de demanda. Ademais, os países que possuem políticas de desenvolvimento sustentável utilizam a tecnologia fotovoltaica como fonte renovável competitiva, inclusive em áreas com acesso limitado ou sem eletricidade (DA SILVA et al., 2019).

Garlet et al. (2019) argumentam que há grande expectativa relacionada ao aumento da capacidade instalada de sistemas FV conectados    rede. No entanto, para impulsionar essa tecnologia,    necessário integrar diferentes atores em um ambiente colaborativo, visando

superar barreiras técnicas, econômicas, gerenciais, políticas e mercadológicas. Esses atores incluem usuários individuais, empresas, comunidades, instituições financeiras e governo. Isso caracteriza uma cadeia de valor, onde os atores interagem, agregam valor, criam e transferem conhecimento e fazem diferentes transações (JUNTUNEN; HYYSALO, 2015). A integração desses atores de forma harmônica leva ao aumento da competitividade tecnológica e contribui para a adoção e difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica (DA SILVA et al., 2019).

Jia, Sun e Koh (2016) e Nahm e Steinfeld (2014) argumentam que a inovação na indústria FV contemporânea depende da fusão de capacidades de múltiplas empresas e da aprendizagem multidirecional envolvendo parceiros globais. Sendo assim, o ganho de escala, a curva de aprendizado, a redução nos custos de serviços e equipamentos decorrentes da rede sustentável formada por esse conjunto de parceiros mobilizam diversos fatores fundamentais para a competitividade. Isso ainda possibilita ampliar o mercado potencial e torna mais atrativo o investimento na tecnologia fotovoltaica (ROSA; SILUK; MICHELS, 2016; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015).

Dessa forma, é possível verificar que os problemas relacionados à difusão da geração distribuída de energia FV e conseqüentemente ao aumento da competitividade da cadeia de valor não estão concentrados em uma única esfera e apresentam uma natureza complexa. Assim, o objetivo deste capítulo é identificar os atores e atividades que compõem a cadeia de valor do setor e os principais fatores que influenciam a competitividade da geração distribuída fotovoltaica. Para realizar essa análise, é necessário observar estudos na literatura sobre as configurações de cadeia de valor e verificar quais são os fatores técnicos, econômicos, gerenciais, políticos e mercadológicos que contribuem para elevar a competitividade dessa fonte de energia renovável.

De maneira a identificar os aspectos cruciais que cada ator pode agregar à rede de geração distribuída de energia fotovoltaica e os fatores essenciais para a sua competitividade, este capítulo da tese realiza uma revisão sistemática que busca compreender as relações entre os principais *stakeholders* para explorar as oportunidades de negócios no setor, resultando em inovação e desenvolvimento tecnológico. A principal contribuição desta revisão é auxiliar pesquisadores, formuladores de políticas, fabricantes, integradores de sistemas FV, distribuidoras de energia e sociedade a compreenderem a dimensão do setor e os elementos que devem ser considerados para a participação crescente dessa fonte renovável na matriz elétrica mundial.

Este capítulo está estruturado em quatro subcapítulos. O subcapítulo dois aborda a metodologia utilizada para realizar a revisão sistemática e análise de conteúdo. O subcapítulo três descreve os resultados e discussões do estudo, enquanto o subcapítulo quatro apresenta as conclusões, destacando as implicações da pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

## 3.2 MÉTODO

Esta revisão foi realizada seguindo as diretrizes da análise sistemática da literatura de modo a atingir o objetivo deste capítulo. A revisão sistemática da literatura é um método confiável para fornecer aos pesquisadores e formuladores de políticas uma visão geral de uma área específica de pesquisa, por meio da identificação, avaliação e análise de estudos prévios em um processo rigoroso, transparente e reproduzível (FARIAS et al., 2019; PHAM; PAILLÉ; HALILEM, 2019). Assim, esta fase do desenvolvimento da tese consistiu em quatro etapas, conduzidas com base no protocolo de revisão *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (MOHER et al., 2009).

O primeiro passo para conduzir a revisão consistiu na definição de questões relevantes de pesquisa, bases de dados e termos de busca que atendessem ao objetivo da revisão. A segunda etapa envolveu a busca nos bancos de dados e seleção preliminar de estudos. O terceiro passo compreendeu a avaliação do conteúdo dos materiais, enquanto a quarta etapa englobou a extração de dados e a síntese dos resultados. As etapas estão detalhadas nas subseções seguintes.

### 3.2.1 Questões de pesquisa, bases de dados e termos de busca

O primeiro passo para conduzir a revisão sistemática consistiu na definição de questões de pesquisa, bases de dados e termos de busca. Dessa forma, a fim de verificar os elos que constituem a cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e os fatores essenciais para a sua competitividade, duas questões de pesquisa foram formuladas: “Qual é a estrutura da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica?” e “Quais fatores influenciam a competitividade e a adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica?”. As bases de dados *Web of Science* e *Scopus* foram selecionadas para a pesquisa de artigos científicos, uma vez que contemplam as principais editoras (SCOPUS, 2017; WEB OF KNOWLEDGE, 2020). As bases selecionadas criaram uma sobreposição de materiais, no

entanto, Garza-Reyes (2015) e Vieira e Amaral (2016) afirmam que se trata de um processo de validação para garantir que todos os documentos relevantes sejam englobados. Adicionalmente, verificou-se a necessidade de realizar a busca em documentos setoriais e normas técnicas de equipamentos e componentes dos sistemas FV para garantir a cobertura de todos os elos da cadeia de valor.

Para a definição dos termos da pesquisa, foram utilizados sinônimos associados às principais palavras envolvendo as questões de pesquisa que poderiam retornar documentos relevantes. Dessa forma, o algoritmo de busca utilizado foi: *title-abstract-keywords* (((*“photovoltaic energy\*”* OR *photovoltaic\** OR *“solar energy\*”* OR *“solar home system\*”* OR *“distributed generation”*) AND ((*“value chain”* OR *stakeholder\**) OR (*factor\** AND *competitiveness*))). Os idiomas de publicação estabelecidos para a pesquisa foram inglês, português e espanhol, visto que representam línguas globais e aumentam as possibilidades em diversos setores internacionais, principalmente no campo científico (MONTGOMERY, 2004; ZYOUD; FUCHS-HANUSCH, 2017). A pesquisa foi realizada entre junho e julho de 2019 e não foi definido filtro de data de publicação dos materiais. Foram selecionados os artigos e revisões publicados em periódicos científicos, que são a principal fonte de pesquisa acadêmica (PEREZ-PEREZ et al., 2015). Ainda, documentos setoriais, relatórios e normas técnicas foram analisados para complementar a busca e responder às questões de pesquisa.

### **3.2.2 Pesquisa nas bases de dados e seleção preliminar**

A busca nas bases de dados resultou em um total de 848 artigos, incluindo materiais duplicados, e seis documentos, normas e relatórios setoriais. A revisão sistemática foi realizada com o auxílio dos softwares Microsoft Excel<sup>TM</sup> e Mendeley<sup>TM</sup> como ferramentas de suporte. O Mendeley<sup>TM</sup> contribuiu para a organização dos materiais encontrados, facilitando a visualização de artigos duplicados, enquanto nas planilhas do Excel<sup>TM</sup> foram armazenadas informações relevantes acerca de cada uma das etapas conduzidas durante a pesquisa, bem como a respeito dos estudos selecionados para análise. Na sequência, a fim de selecionar apenas artigos de alto impacto relacionados à temática, foram estabelecidos os seguintes critérios de exclusão: artigos duplicados e artigos publicados em periódicos científicos posicionados em percentis inferiores a 50% em pelo menos uma das bases. Após a aplicação desses filtros, 435 artigos foram obtidos e posteriormente agrupados com os seis documentos setoriais encontrados para realização de

leitura flutuante e identificação de compatibilidade e adequação ao objetivo da pesquisa. A Tabela 3 apresenta o protocolo de revisão e os dados coletados nesta e nas etapas subsequentes.

Tabela 3 - Protocolo da revisão sistemática

| <b>Etapa da revisão</b>                          | <b>Informações coletadas</b>   |  |
|--|--|--|
| Pesquisa nas bases de dados e seleção preliminar | Ano  |  |
|  | Autores  |  |
|  | Título   |  |
|  | Periódico/Editora  |  |
|  | Palavras-chave   |  |
| Avaliação do conteúdo                            | Percentil do periódico   |  |
|  | Objetivo do estudo   | Grupo 1 (todas as respostas sim):<br>- Os objetivos do estudo estão claros? (sim/não)<br>- Os objetivos do estudo envolvem energia fotovoltaica? (sim/não)   |
|  | Principais resultados  | - O estudo apresenta suas principais contribuições? (sim/não)<br>- Os principais resultados do estudo estão claros? (sim/não)  |
|  | Questões de pesquisa relacionadas  | Grupo 2 (ao menos uma resposta sim):<br>- O estudo apresenta a estrutura da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica? (sim/não)<br>- O estudo apresenta fatores que influenciam a competitividade e a adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica? (sim/não) |
|  |  |  |
| Extração dos dados e síntese dos resultados      | Estrutura da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica<br>Fatores que influenciam a competitividade e a adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica<br>País do estudo<br>Notas gerais |  |

### 3.2.3 Avaliação de conteúdo

Nesta etapa, os 435 artigos e os seis documentos setoriais selecionados foram analisados para verificar se respondiam às questões fundamentais estabelecidas e expostas na Tabela 3. Os estudos que apresentaram todas as respostas positivas para as questões do grupo 1 e ao menos uma resposta positiva para o grupo 2 continuaram na pesquisa, resultando em 139 materiais que atenderam ao objetivo do estudo e puderam ser lidos na íntegra para análise dos dados.

### 3.2.4 Extração dos dados e síntese dos resultados

Os 139 materiais foram lidos na íntegra para identificar os estudos relevantes para responder às questões de pesquisa, resultando em 88 artigos e seis documentos setoriais relacionados ao tema. O último passo envolveu a extração das informações relevantes acerca da composição da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e dos fatores que influenciam a competitividade do setor. Dois bancos de dados foram construídos para armazenar informações sobre a cadeia de valor e os 191 fatores extraídos para análise. A definição dos elos e fatores foi realizada em duas partes, sendo estudado inicialmente o significado real de cada informação levantada a fim de entender se poderiam ser agrupadas por apresentarem o mesmo objetivo. Dessa forma, os 191 fatores inicialmente identificados foram reduzidos a 41 fatores independentes, organizados nas dimensões econômica, política e mercadológica, gerencial e técnica.

## 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

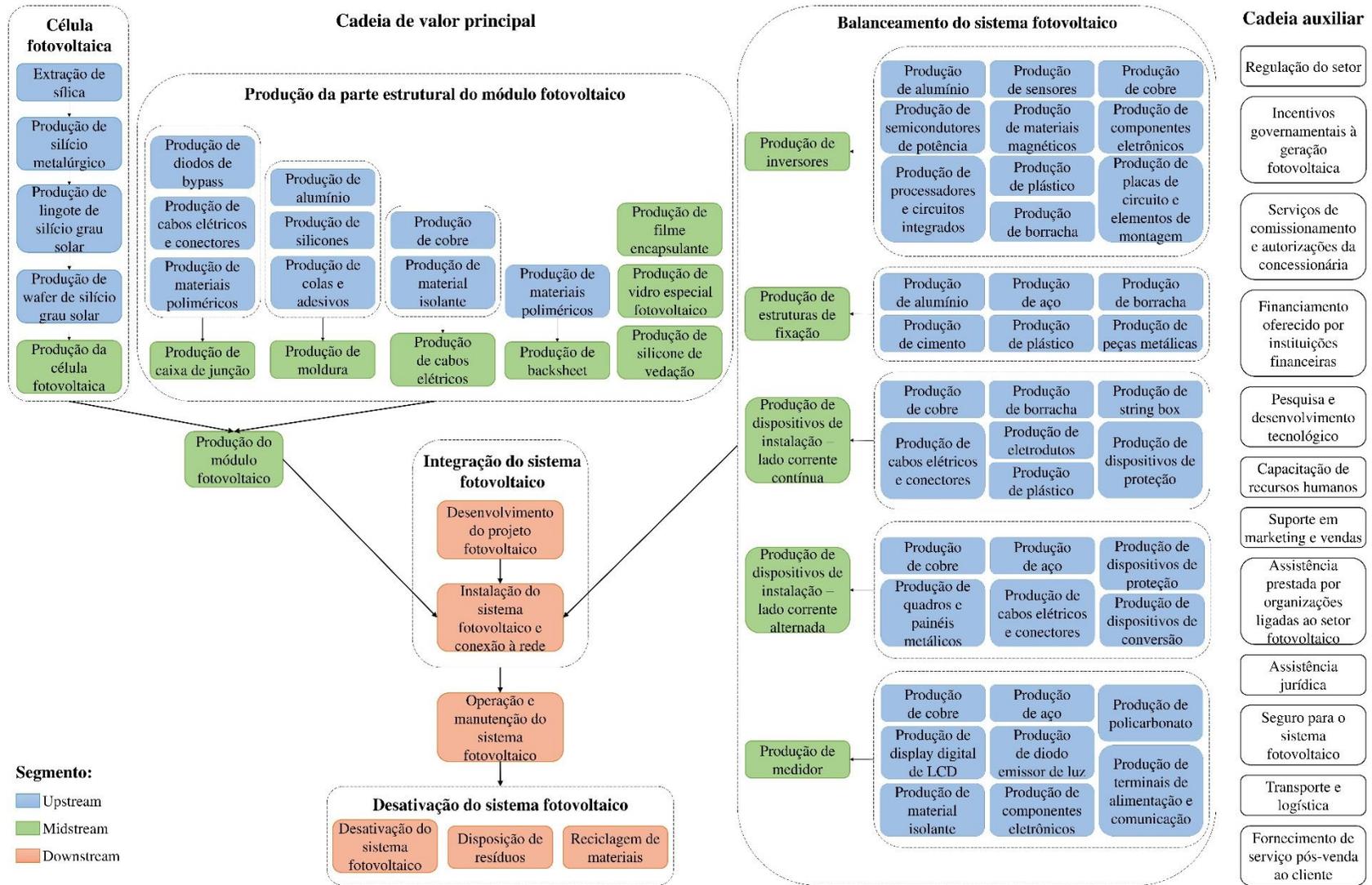
A revisão sistemática realizada resultou em 88 artigos e seis documentos setoriais relacionados ao tema, publicados entre 1989 e 2019. O ano com maior número de publicações foi 2018, com 30 estudos, seguido pelos anos de 2017 e 2019, com 11 estudos cada. Os periódicos científicos *Energy Policy* e *Renewable and Sustainable Energy Reviews* se destacaram com 15 e 12 artigos, respectivamente. Na questão de países com maior número de publicações, a prevalência foi Estados Unidos, com 18 estudos, e Alemanha, com 15 estudos. O artigo com o maior número de citações é o de Grau, Huo e Neuhoff (2012), com 122 citações, abordando as políticas e atores que podem incentivar a implantação e o investimento nas

tecnologias fotovoltaicas na Alemanha e na China. Com base na análise de publicações selecionadas, foi desenvolvida de forma detalhada a cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e foram levantados os fatores que influenciam a competitividade e a adoção desta fonte de energia renovável.

### **3.3.1 Cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica**

A cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica é normalmente definida de duas formas distintas. A primeira definição engloba a produção de silício para a fabricação de lingotes, *wafers* e células, abrangendo o processo de produção de módulos FV (YU, Z., 2018); no entanto, essa configuração ignora o contexto mais amplo da cadeia de valor fotovoltaica. Por sua vez, a segunda definição inclui outros setores fundamentais na geração de valor da cadeia fotovoltaica, como a produção de equipamentos e componentes do sistema FV, o balanceamento e a instalação do sistema, o desenvolvimento do projeto e sua operação e manutenção (ZHANG; GALLAGHER, 2016). Essas duas definições usualmente encontradas na literatura, entretanto, não consideram as etapas subsequentes à operação e à manutenção do sistema, nem as atividades realizadas pela cadeia auxiliar para agregar valor à geração FV distribuída. Assim, a partir da análise dos estudos encontrados na revisão sistemática, a Figura 7 apresenta, de modo singular, amplo e detalhado, todas as etapas da cadeia de valor nos segmentos *upstream*, *midstream*, *downstream* e auxiliar.

Figura 7 - Cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica



A cadeia de valor abrange toda a gama de atividades realizadas por um conjunto de empresas e organizações a fim de trazer um produto ou serviço desde a concepção, através de fases de produção distintas, até a entrega aos consumidores finais e posterior desativação e descarte ao término da vida útil (ZHANG; GALLAGHER, 2016). De acordo com Haley e Schuler (2011), Hu e Yeh (2013), Liu e Lin (2019), Su (2013) e Zhang e Gallagher (2016), as atividades da cadeia de valor principal da geração distribuída de energia fotovoltaica são divididas em *upstream*, *midstream* e *downstream*. Como pode ser visto na Tabela 4, o segmento *upstream* engloba as etapas anteriores à fabricação da célula FV, a produção das matérias-primas da parte estrutural do módulo FV e a fabricação de materiais presentes nos componentes necessários ao balanceamento do sistema fotovoltaico.

Tabela 4 - Elos *upstream* da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica

(continua)

| <b>Elo</b>                                     | <b>Referências</b>   |
|--|--|
| Extração de sílica                             | Chatzisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Eskew et al. (2018), Haley e Schuler (2011), Jaegersberg e Ure (2011), Lee et al. (2017), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), Z. Yu (2018)  |
| Produção de silício metalúrgico                | Arora et al. (2018), Corcelli et al. (2019), Eskew et al. (2018), Jaegersberg e Ure (2011), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019)   |
| Produção de lingote de silício grau solar      | Arora et al. (2018), Castellanos et al. (2018), Chatzisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Grau, Huo e Neuhoff (2012), Haley e Schuler (2011), Hu e Yeh (2013), IEA (2010), Jaegersberg e Ure (2011), Jayanthi, Witt e Singh (2009), Kim e Lee (2018), Lee et al. (2017), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019), Su (2013), Wijeratne et al. (2019), Z. Yu (2018), Zhang e Gallagher (2016)   |
| Produção de <i>wafer</i> de silício grau solar | Arora et al. (2018), Castellanos et al. (2018), Chatzisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Grau, Huo e Neuhoff (2012), Haley e Schuler (2011), Hu e Yeh (2013), IEA (2010), Jaegersberg e Ure (2011), Jayanthi, Witt e Singh (2009), Kim e Lee (2018), Lacerda e van den Bergh (2016), Lee et al. (2017), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), Smith e Margolis (2019), Su (2013), Wijeratne et al. (2019), Z. Yu (2018), Zhang e Gallagher (2016) |
| Produção de diodos de <i>bypass</i>            | Arora et al. (2018), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016)  |

Tabela 4 - Elos *upstream* da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica

(continuação)

|  |   |
|--|---|
| Produção de cabos elétricos e conectores               | Arora et al. (2018), Chatzisisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Hu e Yeh (2013), Jaegersberg e Ure (2011), Lacerda e van den Bergh (2016), Liu e Lin (2019), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019), Votteler, Hough e Venter (2014), Wijeratne et al. (2019), Zhang e Gallagher (2016) |
| Produção de materiais poliméricos                      | Arora et al. (2018), Eskew et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019)   |
| Produção de alumínio                                   | Arora et al. (2018), Chatzisisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Hu e Yeh (2013), Liu e Lin (2019), Meckling e Hughes (2017), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019), Wijeratne et al. (2019), Zhang e Gallagher (2016)   |
| Produção de silicões                                   | Corcelli et al. (2019), SEBRAE (2018)   |
| Produção de colas e adesivos                           | Arora et al. (2018), Corcelli et al. (2019), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019)   |
| Produção de cobre                                      | Arora et al. (2018), ABNT (2011), Corcelli et al. (2019), Eskew et al. (2018), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), Smith e Margolis (2019)  |
| Produção de material isolante                          | ABNT (2011), Corcelli et al. (2019), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Smith e Margolis (2019)  |
| Produção de sensores                                   | Ankit et al. (2018)   |
| Produção de semicondutores de potência                 | Ankit et al. (2018), ESP KTN (2013), Pushpakaran et al. (2016)  |
| Produção de materiais magnéticos                       | Ankit et al. (2018), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016)   |
| Produção de componentes eletrônicos                    | Ankit et al. (2018), Arora et al. (2018), ABNT (2011), ESP KTN (2013), IEA (2010), Lacerda e van den Bergh (2016), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019)   |
| Produção de processadores e circuitos integrados       | Ankit et al. (2018), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016)   |
| Produção de borracha                                   | Eskew et al. (2018)   |
| Produção de plástico                                   | Arora et al. (2018), Corcelli et al. (2019), Pushpakaran et al. (2016), Smith e Margolis (2019)   |
| Produção de placas de circuito e elementos de montagem | Arora et al. (2018), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016)   |

Tabela 4 - Elos *upstream* da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica

(conclusão)

|  |  |
|--|--|
| Produção de aço                                    | Arora et al. (2018), ABNT (2011), Chatzisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), Hu e Yeh (2013), Kourkoumpas et al. (2018), Madvar et al. (2018), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019), Su (2013), Wijeratne et al. (2019), Zhang e Gallagher (2016) |
| Produção de cimento                                | Corcelli et al. (2019), Smith e Margolis (2019)  |
| Produção de peças metálicas                        | Arora et al. (2018), Corcelli et al. (2019), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019)   |
| Produção de <i>string box</i>                      | Padmanathan et al. (2018), SEBRAE (2018)   |
| Produção de eletrodutos                            | Eskew et al. (2018), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019)  |
| Produção de dispositivos de proteção               | Ankit et al. (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018)  |
| Proteção de quadros e painéis metálicos            | Padmanathan et al. (2018), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019)  |
| Produção de dispositivos de conversão              | Ankit et al. (2018), Corcelli et al. (2019), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Padmanathan et al. (2018), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019)   |
| Produção de policarbonato                          | ABNT (2011), SEBRAE (2018)   |
| Produção de display digital de LCD                 | ABNT (2011)  |
| Produção de diodo emissor de luz                   | ABNT (2011)  |
| Produção de terminais de alimentação e comunicação | ABNT (2011)  |

Em relação à indústria solar fotovoltaica global, o setor *upstream* obtém os maiores lucros, visto que a concorrência é relativamente pequena e o mercado tende a ser oligopolista (LIU; LIN, 2019). Grupos *upstream* envolvem empresas que possuem um nível tecnológico elevado e específico, com um alto custo de investimento nas instalações. Assim, a barreira de entrada é severa, pois apenas empresas com alta receita operacional podem competir nesse segmento da cadeia de valor (LEE et al., 2017). Para contornar essas barreiras técnicas e dificuldades de fornecimento, as empresas *upstream* geralmente formam alianças internacionais para estabelecer fábricas ou incentivar a cooperação técnica para organizar uma cadeia de suprimentos de matérias-primas para empresas *midstream* e *downstream* (SU, 2013).

Haley e Schuler (2011) destacam que as empresas desse setor podem apoiar políticas para abrir novos mercados, garantir insumos e vender produtos *downstream* nos mercados interno e externo. Para isso, elas precisam lidar com a incerteza regulatória desenvolvendo estratégias não-mercadológicas para a liberalização do comércio.

A cadeia de valor *upstream* cria maior valor agregado à geração distribuída de energia fotovoltaica, pois envolve mais conhecimentos específicos de empresas e pessoas, em vez de rotinas codificadas padronizadas (ZHANG; GALLAGHER, 2016). Nos Estados Unidos, China e Taiwan, esse setor apresentou rápido crescimento devido aos subsídios governamentais e financeiros e aos contratos entre as empresas de extração, purificação e fabricação de silício e as empresas que produzem células e módulos fotovoltaicos (MECKLING; HUGHES, 2017; SU, 2013). Além disso, a expansão do setor *upstream* pode estar relacionada ao fato de que a indústria solar baseada em silício tem efeito de substituição para gerar alto valor de produção quando o preço da gasolina aumenta (SU, 2013).

Já o segmento *midstream* constitui a parte central da cadeia de valor e engloba a produção da célula fotovoltaica, caixa de junção, moldura, cabos elétricos, *backsheet*, filme encapsulante, vidro especial fotovoltaico, silicone de vedação e módulo fotovoltaico. Ainda, como mostra a Tabela 5, são fabricados os componentes para balanceamento do sistema fotovoltaico, como inversores, estruturas de fixação, dispositivos de instalação para os lados de corrente contínua e alternada e medidor.

Tabela 5 - Elos *midstream* da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica

(continua)

| <b>Elo</b>                      | <b>Referências</b>  |
|---------------------------------|---|
| Produção da célula fotovoltaica | Arora et al. (2018), Castellanos et al. (2018), Chatzisisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Grau, Huo e Neuhoff (2012), Haley e Schuler (2011), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Hu e Yeh (2013), IEA (2010), Jaegersberg e Ure (2011), Jayanthi, Witt e Singh (2009), Kim e Lee (2018), Lacerda e van den Bergh (2016), Lee et al. (2017), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Shubbak (2019), Smith e Margolis (2019), Su (2013), Wijeratne et al. (2019), Z. Yu (2018), Zhang e Gallagher (2016) |
| Produção de caixa de junção     | Arora et al. (2018), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Padmanathan et al. (2018), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019)  |

Tabela 5 – Elos *midstream* da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica

(continuação)

|   |  |
|---|--|
| Produção de moldura                     | Arora et al. (2018), Corcelli et al. (2019), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Padmanathan et al. (2018), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019)  |
| Produção de cabos elétricos             | Arora et al. (2018), Chatzisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Hu e Yeh (2013), Jaegersberg e Ure (2011), Lacerda e van den Bergh (2016), Liu e Lin (2019), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019), Votteler, Hough e Venter (2014), Wijeratne et al. (2019), Zhang e Gallagher (2016)  |
| Produção de <i>backsheet</i>            | Arora et al. (2018), Chatzisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), ESP KTN (2013), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Hu e Yeh (2013), Kim e Lee (2018), Kourkoumpas et al. (2018), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Padmanathan et al. (2018), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019), Su (2013), Zhang e Gallagher (2016)  |
| Produção de filme encapsulante          | Arora et al. (2018), Chatzisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Hu e Yeh (2013), IEA (2010), Kim e Lee (2018), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019), Su (2013), Zhang e Gallagher (2016)   |
| Produção de vidro especial fotovoltaico | Arora et al. (2018), Chatzisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Hu e Yeh (2013), Kourkoumpas et al. (2018), Lacerda e van den Bergh (2016), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Smith e Margolis (2019), Su (2013), Wijeratne et al. (2019), Zhang e Gallagher (2016)   |
| Produção de silicone de vedação         | Arora et al. (2018), Corcelli et al. (2019), ESP KTN (2013), SEBRAE (2018)   |
| Produção de módulo fotovoltaico         | Ankit et al. (2018), Arora et al. (2018), Castellanos et al. (2018), Chatzisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Grau, Huo e Neuhoff (2012), Haley e Schuler (2011), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Hu e Yeh (2013), IEA (2010), Jaegersberg e Ure (2011), Jayanthi, Witt e Singh (2009), Lacerda e van den Bergh (2016), Lee et al. (2017), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Shubbak (2019), Smith e Margolis (2019), Su (2013), Wijeratne et al. (2019), Z. Yu (2018), Zhang e Gallagher (2016) |

Tabela 5 – Elos *midstream* da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica  
(conclusão)

|  |   |
|--|---|
| Produção de inversores   | Ankit et al. (2018), Chatzisisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Hu e Yeh (2013), IEA (2010), Jaegersberg e Ure (2011), Jayanthi, Witt e Singh (2009), Kim e Lee (2018), Kourkoupas et al. (2018), Lee et al. (2017), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Shubbak (2019), Smith e Margolis (2019), Su (2013), Wijeratne et al. (2019), Zhang e Gallagher (2016) |
| Produção de estruturas de fixação                                | Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Hu e Yeh (2013), IEA (2010), Jaegersberg e Ure (2011), Jayanthi, Witt e Singh (2009), Kim e Lee (2018), Kourkoupas et al. (2018), Lacerda e van den Bergh (2016), Lee et al. (2017), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018), Shubbak (2019), Smith e Margolis (2019), Wijeratne et al. (2019), Zhang e Gallagher (2016)  |
| Produção de dispositivos de instalação – lado corrente contínua  | Ankit et al. (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018)   |
| Produção de dispositivos de instalação – lado corrente alternada | Ankit et al. (2018), ESP KTN (2013), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), SEBRAE (2018)  |
| Produção de medidor  | ESP KTN (2013), Padmanathan et al. (2018), SEBRAE (2018)  |

Diferentemente do segmento *upstream*, as empresas *midstream* alcançam menores lucros dentro da cadeia de valor. Nesse setor, as barreiras de entrada são menores, há baixo valor agregado, a eficiência na utilização de recursos é alta e o mercado está próximo da concorrência ideal (LIU; LIN, 2019; SU, 2013). A margem de lucro da cadeia *midstream* vem diminuindo no decorrer dos anos, uma vez que a concorrência se intensifica e os lucros de mercado são diluídos junto aos novos entrantes (LIU; LIN, 2019). Além disso, com menores barreiras de entrada, as empresas *midstream* empregam estratégias de nicho de mercado relacionadas a qualidade, diferenciação tecnológica, serviço, eficiência operacional, distribuição rápida e preço para competir pelo aumento da demanda. Dessa forma, as empresas podem adotar estratégias não-mercadológicas em mercados altamente competitivos e com

produtos comercializados internacionalmente para favorecer políticas de apoio à produção interna que subsidiem a pesquisa e desenvolvimento (P&D). Essas estratégias incluem *lobby* e formação de coalizões para moldar estruturas políticas, fortalecer a propriedade intelectual, buscar proteção comercial contra rivais estrangeiros e manter mercados abertos para seus produtos (HALEY; SCHULER, 2011).

O setor *midstream* está consolidado, de modo que a margem de lucro está diminuindo para as empresas desse segmento da cadeia. De forma geral, existem diversos concorrentes, as empresas dependem do corte de custos, uniformização dos produtos e padronização dos equipamentos para tornar a geração FV competitiva em relação a outras fontes de energia (HU; YEH, 2013). A China merece destaque neste cenário, tendo desenvolvido uma base e potencial de produção sólidos, desempenhando um papel importante no mercado fotovoltaico internacional e contribuindo para a redução de custos e melhoria da eficiência dos componentes do sistema FV (SUN et al., 2014).

O segmento *downstream*, por sua vez, abrange as atividades mais diretamente ligadas ao consumidor final, como a integração do sistema fotovoltaico, composta pelo desenvolvimento do projeto, instalação do sistema fotovoltaico e conexão à rede. Ainda, engloba a operação e manutenção do sistema FV, a desativação do sistema, a disposição de resíduos e a reciclagem de materiais. A Tabela 6 apresenta os elos do segmento *downstream*, bem como as referências correspondentes.

Tabela 6 - Elos *downstream* da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica

(continua)

| <b>Elo</b>                         | <b>Referências</b>   |
|------------------------------------|--|
| Integração do sistema fotovoltaico | Agnew, Smith e Dargusch (2018), Arora et al. (2018), Camarinha-Matos et al. (2017), Chatzisideris et al. (2016), Curtius (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Haley e Schuler (2011), Hu e Yeh (2013), IEA (2010), Jaegersberg e Ure (2011), Jayanthi, Witt e Singh (2009), Keirstead (2007), Kim, Hwang e Jung (2018), Kim e Lee (2018), Kourkoumpas et al. (2018), Lee et al. (2017), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Moser et al. (2017), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), Quansah e Adaramola (2018), Sawhney et al. (2014), Shum e Watanabe (2009), Su (2013), Tanaka et al. (2018), Votteler, Hough e Venter (2014), Wijeratne et al. (2019), Zhang e Gallagher (2016) |

Tabela 6 - Elos *downstream* da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica  
(conclusão)

|   |  |
|---|--|
| Desenvolvimento do projeto fotovoltaico             | Arora et al. (2018), Camarinha-Matos et al. (2017), Curtius (2018), Elmoustapha, Hoppe e Bressers (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), Jahn et al. (2018), Kim, Hwang e Jung (2018), Mateo et al. (2017), Meckling e Hughes (2017), Moser et al. (2017), Padmanathan et al. (2018), Pang, He e Cai (2019), Quansah e Adaramola (2018), Shum e Watanabe (2009), Votteler, Hough e Venter (2014), Wijeratne et al. (2019), Wu e Zhou (2019)  |
| Instalação do sistema fotovoltaico e conexão à rede | Agnew, Smith e Dargusch (2018), Arora et al. (2018), Camarinha-Matos et al. (2017), Chatzisisideris et al. (2016), Curtius (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Haley e Schuler (2011), Holtorf et al. (2015), Hu e Yeh (2013), Jaegersberg e Ure (2011), Jahn et al. (2018), Jayanthi, Witt e Singh (2009), Keirstead (2007), Kim, Hwang e Jung (2018), Kim e Lee (2018), Kourkoumpas et al. (2018), Lee et al. (2017), Liu e Lin (2019), Luo et al. (2018), Madvar et al. (2018), Meckling e Hughes (2017), Moser et al. (2017), Oliva, Macgill e Passey (2016), Osseweijer et al. (2018), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), Quansah e Adaramola (2018), Sawhney et al. (2014), Shan e Yang (2019), Shum e Watanabe (2009), Smith e Margolis (2019), Su (2013), Tanaka et al. (2018), Votteler, Hough e Venter (2014), Wijeratne et al. (2019), Wu e Zhou (2019), Zhang e Gallagher (2016) |
| Operação e manutenção do sistema fotovoltaico       | Arora et al. (2018), Camarinha-Matos et al. (2017), Chatzisisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Curtius (2018), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra e Alonso-Gómez (2019), IEA (2010), Jaegersberg e Ure (2011), Jahn et al. (2018), Keirstead (2007), Kim, Hwang e Jung (2018), Madvar et al. (2018), Moser et al. (2017), Oliva, Macgill e Passey (2016), Padmanathan et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), Quansah e Adaramola (2018), Shan e Yang (2019), Shubbak (2019), Votteler, Hough e Venter (2014), Wijeratne et al. (2019), Zhang e Gallagher (2016)   |
| Desativação do sistema fotovoltaico                 | Arora et al. (2018), Camarinha-Matos et al. (2017), Chatzisisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Kourkoumpas et al. (2018), Moser et al. (2017), Pushpakaran et al. (2016), Votteler, Hough e Venter (2014), Wijeratne et al. (2019)   |
| Disposição de resíduos                              | Arora et al. (2018), Chatzisisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Kourkoumpas et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), Votteler, Hough e Venter (2014), Wijeratne et al. (2019)  |
| Reciclagem de materiais                             | Arora et al. (2018), Besiou and van Wassenhove (2016), Camarinha-Matos et al. (2017), Chatzisisideris et al. (2016), Corcelli et al. (2019), Eskew et al. (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), IEA (2010), Kourkoumpas et al. (2018), Pushpakaran et al. (2016), Votteler, Hough e Venter (2014), Wijeratne et al. (2019)  |

Devido à maturidade das tecnologias de fabricação e às baixas barreiras de entrada, o setor *downstream* é considerado um mercado perfeitamente competitivo, e as empresas desse segmento obtêm lucros por montagem, manutenção de produtos e prestação de serviços (SU, 2013). No setor *downstream* da cadeia de valor fotovoltaica, estratégias não relacionadas ao mercado são essenciais em decorrência da intensa concorrência de preços. Políticas de conscientização sobre a importância dessa fonte de energia renovável, redução de custos e disponibilização da tecnologia aos consumidores são importantes para que as empresas *downstream* obtenham assistência ao consumo para fortalecerem seus negócios e, assim, expandirem sua participação no mercado (HALEY; SCHULER, 2011).

As empresas *downstream* podem ser caracterizadas como dependentes de uma configuração de sistemas globais de inovação ancorados na produção e sistemas de avaliação padronizados. Isto indica que o setor privilegia a inovação que requer a engenharia baseada na experiência e a adaptação incremental de soluções para novas oportunidades tecnológicas que surgem nos mercados globais (HIPPEL; BINZ, 2020). De acordo com Zhang e Gallagher (2016), a cadeia de valor *downstream* é dominada pelo Japão, China, Alemanha, Itália e Estados Unidos, tendo em vista que a implantação de sistemas fotovoltaicos está localizada principalmente nesses locais. Destaca-se ainda que, na China, a lucratividade das empresas aumentou com a introdução da política de subsídio *Feed-In Tariff* (FIT) no setor *downstream*, que também resolveu problemas de excesso de capacidade da indústria de energia solar fotovoltaica e impulsionou o mercado doméstico (WANG et al. 2016).

Além da cadeia de valor principal, formada pelos segmentos *upstream*, *midstream* e *downstream*, existe uma cadeia de valor auxiliar, composta por empresas e organizações essenciais para o desenvolvimento do setor fotovoltaico (LIU; LIN, 2019). Conforme apresentado na Tabela 7, a cadeia de valor auxiliar compreende regulação do setor, incentivos governamentais à geração fotovoltaica, serviços de comissionamento e autorizações da concessionária, disponibilização de financiamentos por instituições financeiras, pesquisa e desenvolvimento tecnológico, capacitação de recursos humanos, suporte em marketing e vendas. Ademais, engloba assistência prestada por organizações ligadas ao setor fotovoltaico, assistência jurídica, fornecimento de seguros para o sistema FV, transporte e logística e prestação de serviço de pós-venda ao cliente.

Tabela 7 - Elos da cadeia de valor auxiliar da geração distribuída de energia fotovoltaica

(continua)

| <b>Elo</b>  | <b>Referências</b>  |
|---|---|
| Regulação do setor  | Arora et al. (2018), Camarinha-Matos et al. (2017), ESP KTN (2013), IEA (2010)  |
| Incentivos governamentais à geração fotovoltaica                    | Agnew, Smith e Dargusch (2018), Aqeeq et al. (2018), Arora et al. (2018), Besiou e van Wassenhove (2016), ESP KTN (2013), Gözl e Wedderhoff (2018), Guerrero-Liquet et al. (2018), IEA (2010), Karakaya e Sriwannawit (2015), Keirstead (2007), Kim, Hwang e Jung (2018), Lo, Wang e Huang (2013), Madvar et al. (2018), Oliva, Macgill e Passey (2016), Olson (2014), Osseweijer et al. (2018), Pang, He e Cai (2019), Pitt, Michaud e Duggan (2018), Shan e Yang (2019), Sueyoshi e Goto (2014), Wijeratne et al. (2019), Yang e Zou (2016)   |
| Serviços de comissionamento e autorizações da concessionária        | Agnew, Smith e Dargusch (2018), Aqeeq et al. (2018), Arora et al. (2018), Camarinha-Matos et al. (2017), Chen e Su (2014), Curtius (2018), ESP KTN (2013), Gözl e Wedderhoff (2018), IEA (2010), Keirstead (2007), Kourkoumpas et al. (2018), Mateo et al. (2017), Oliva, Macgill e Passey (2016), Olson (2014), Pitt, Michaud e Duggan (2018), Pushpakaran et al. (2016), Sawhney et al. (2014), Sueyoshi e Goto (2014), Tanaka et al. (2018), Wijeratne et al. (2019), Wu e Zhou (2019)   |
| Financiamento oferecido por instituições financeiras                | Aly et al. (2019), Aqeeq et al. (2018), Arora et al. (2018), Curtius (2018), ESP KTN (2013), IEA (2010), Jaegersberg e Ure (2011), Karakaya e Sriwannawit (2015), Shan e Yang (2019), Wijeratne et al. (2019), Wu e Zhou (2019)   |
| Pesquisa e desenvolvimento tecnológico                              | Agnew, Smith e Dargusch (2018), Aly et al. (2019), Arora et al. (2018), Camarinha-Matos et al. (2017), Elmoustapha, Hoppe e Bressers (2018), ESP KTN (2013), Funcke (2012), Gözl e Wedderhoff (2018), IEA (2010), Jaegersberg e Ure (2011), Karakaya e Sriwannawit (2015), Kim, Hwang e Jung (2018), Klitkou e Coenen (2013), Lo, Wang e Huang (2013), Madvar et al. (2018), Martins e Pereira (2011), Moser et al. (2017), Osseweijer et al. (2018), Pitt, Michaud e Duggan (2018), Quansah e Adaramola (2018), Sawhney et al. (2014), Shubbak (2019), Tsoutsos et al. (2013), Votteler, Hough e Venter (2014), Zhang e Gallagher (2016) |
| Capacitação de recursos humanos                                     | Camarinha-Matos et al. (2017), ESP KTN (2013), IEA (2010), Votteler, Hough e Venter (2014)  |
| Suporte em marketing e vendas                                       | ESP KTN (2013), Funcke (2012), Osseweijer et al. (2018), Votteler, Hough e Venter (2014)  |
| Assistência prestada por organizações ligadas ao setor fotovoltaico | Aly et al. (2019), Arora et al. (2018), Besiou e van Wassenhove (2016), Elmoustapha, Hoppe e Bressers (2018), Gözl e Wedderhoff (2018), IEA (2010), Keirstead (2007), Klitkou e Coenen (2013), Martins e Pereira (2011), Mateo et al. (2017), Osseweijer et al. (2018), Tsoutsos et al. (2013), Wijeratne et al. (2019)   |
| Assistência jurídica  | Agnew, Smith e Dargusch (2018), Arora et al. (2018), ESP KTN (2013), IEA (2010), Olson (2014), Pitt, Michaud e Duggan (2018)  |

Tabela 7 - Elos da cadeia de valor auxiliar da geração distribuída de energia fotovoltaica

(conclusão)

|   |   |
|---|---|
| Seguro para o sistema fotovoltaico              | ESP KTN (2013), Jahn et al. (2018), Wijeratne et al. (2019)             |
| Transporte e logística                          | Arora et al. (2018), Camarinha-Matos et al. (2017), Moser et al. (2017) |
| Fornecimento de serviço de pós-venda ao cliente | Votteler, Hough e Venter (2014)   |

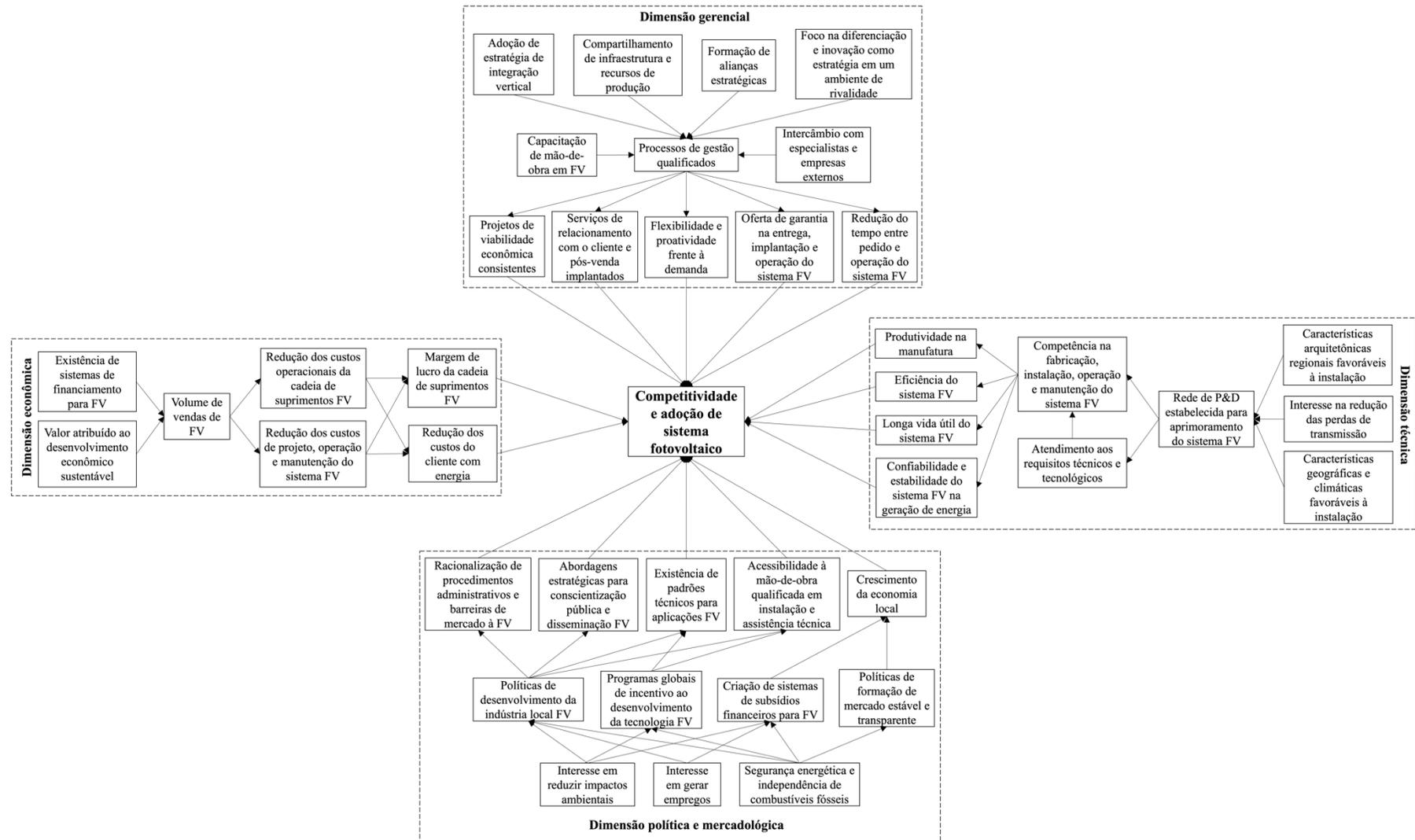
A cadeia de valor auxiliar tem como função apoiar, direta ou indiretamente, a execução das atividades da estrutura principal (VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014). Essas atividades secundárias possibilitam a interação de empresas, instituições, governo e consumidores dentro do mesmo segmento de valor ou em diferentes segmentos ao longo da cadeia global de valor (KLITKOU; COENEN, 2013). Além disso, a relação entre os diferentes atores das cadeias de valor auxiliar e principal permite a troca de conhecimentos técnicos, informações de mercado e *feedback* (ZHANG; GALLAGHER, 2016). Ainda, é possível destacar que as atividades auxiliares estão relacionadas à melhoria da capacidade humana, desenvolvida por meio de conscientização e treinamento, e às mudanças na demanda por tecnologia, que levam ao investimento industrial (MADVAR et al., 2018).

Nas atividades da cadeia auxiliar, identifica-se também a importância de os formuladores de políticas escolherem esquemas de financiamento e incentivos adequados à geração fotovoltaica, além de considerarem as necessidades e tradições locais das comunidades envolvidas para proporcionarem benefícios sociais e econômicos (ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018). De acordo com Garlet et al. (2019), é necessário o envolvimento de empresas, governo, instituições financeiras, pesquisadores e comunidade em diferentes atividades da cadeia de valor global como uma estratégia de diferenciação em relação às tradicionais fontes de energia. Apoiada em uma estrutura de valor coesa e com ligações e interações sólidas entre os diferentes atores, a geração distribuída de energia fotovoltaica pode se diferenciar da concorrência e se posicionar como uma fonte competitiva através de diversos fatores que tornam essa tecnologia passível de expansão.

### **3.3.2 Fatores que influenciam a competitividade e a adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica**

Este tópico discute os aspectos que influenciam a competitividade e a adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica. Os 41 fatores encontrados, apresentados na Figura 8, derivam da revisão sistemática realizada e foram agrupados de acordo com as dimensões econômica, gerencial, técnica e política e mercadológica.

Figura 8 - Fatores que influenciam a competitividade e a adoção da energia fotovoltaica



### 3.3.2.1 Dimensão econômica

No contexto econômico, um dos principais motivadores para a adoção da tecnologia fotovoltaica e, conseqüentemente, competitividade do setor é o valor atribuído ao desenvolvimento econômico sustentável (CAMARGO et al., 2016; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; HE et al., 2017; JAMAL et al., 2017; JARACH, 1989; KAPOOR et al., 2014; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; NYGAARD et al., 2017; SHUAI et al., 2018; YU, H. J. J., 2018; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Shuai et al. (2018) afirmam que os recursos energéticos, benefícios ecológicos, inovação tecnológica e crescimento econômico energeticamente seguro no meio ambiente são aspectos determinantes para alcançar as metas globais e a competitividade relacionada. Além disso, características como idade, composição familiar, renda e nível de escolaridade influenciam diretamente a percepção do consumidor e o desejo de investir em novas tecnologias limpas de geração de eletricidade (JAMAL et al., 2017; YU, H. J. J., 2018). Esta afirmação é corroborada por Elmustapha, Hoppe e Bressers (2018), que destacam que os possíveis consumidores podem adiar a decisão em decorrência de outros compromissos financeiros prioritários, mesmo que considerem interessante a opção de comprar um sistema fotovoltaico.

Outro fator a ser ponderado pelos consumidores no início da análise sobre a decisão do investimento é a existência de sistemas de financiamento para adoção de geração distribuída de energia fotovoltaica (CAMARGO et al., 2016; DOBROTKOVA; SURANA; AUDANA, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; HUO; ZHANG, 2012; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; PERNG; HO, 2013; NYGAARD et al., 2017; SU, 2013; TSOUTSOS et al., 2013; WALTERS ; KAMINSKY; GOTTSCHAMER, 2018; WIJERATNE et al., 2019; YANG; ZOU, 2016; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Nygaard et al. (2017) afirmam que os altos custos iniciais, as altas taxas de juros e o difícil acesso ao capital são barreiras à difusão FV, e a introdução de mecanismos de financiamento inovadores é apontada como uma iniciativa para mitigar esses desafios, alavancando o incentivo a investimentos no setor fotovoltaico (KAPOOR et al., 2014). Os consumidores devem analisar os diferentes tipos de contratos de financiamento disponíveis para sistemas FV e considerar custos de mercado atualizados, custos de energia, dívida, inflação, depreciação, seguro e valor residual para pagamento do custo de capital do sistema (WIJERATNE et al., 2019). Destaca-se ainda que a capacidade de o mercado oferecer descontos e promoções para financiar um sistema FV tende

a ser um dos fatores mais influentes na adoção e competitividade dessa tecnologia (WALTERS; KAMINSKY; GOTTSCHAMER, 2018).

Após analisar os aspectos econômicos que servem de base para a adoção fotovoltaica, o volume de vendas de sistemas FV é identificado como outro fator importante para determinar a competitividade desse segmento (LEE et al., 2012; LIU; LIN, 2019). O aumento da produção de energia renovável diminui o preço unitário e eleva o volume de vendas, levando a um aumento no valor de investimento em P&D no setor. Nota-se ainda que a geração distribuída de energia fotovoltaica apresenta uma taxa de aumento anual elevada em comparação com outras fontes de energia renovável (SIM, 2018). Ademais, Liu e Lin (2019) afirmam que as vendas de produtos FV devem se concentrar na abertura do mercado doméstico e no desenvolvimento de uma base de usuários mais ampla, incluindo áreas de baixa renda, especialmente em locais com alta incidência solar.

O aumento na quantidade de vendas apresenta influência direta na redução dos custos operacionais na cadeia de suprimentos fotovoltaica, sendo essa uma fonte de vantagem competitiva do setor (GUERRERO-LEMUS et al., 2013; JARACH, 1989; LEE et al., 2012; LIU; LIN, 2019; MAULEON, 2019; SHUAI et al., 2018; SUGANDHAVANIJA et al., 2011). As empresas, para competirem com sucesso no segmento, precisam diminuir seu custo de produção e devem atingir metas de pesquisa e desenvolvimento com despesas limitadas (LEE et al., 2012). Dessa forma, é necessário que as empresas realizem o controle dos custos incorridos na venda e distribuição de produtos, das despesas administrativas e dos ativos fixos para que os clientes se sintam motivados e atraídos a investirem em sistemas fotovoltaicos e as empresas obtenham lucros satisfatórios e expandam seu volume de vendas. Além disso, à medida que a tecnologia fotovoltaica amadurece e os custos dos sistemas FV diminuem, a demanda por esses sistemas nos países em desenvolvimento cresce e, conseqüentemente, as vantagens de produzir células e módulos FV próximo a esses países aumentam (GUERRERO-LEMUS et al., 2013).

Um acréscimo no volume de vendas impacta também na redução dos custos de projeto, operação e manutenção do sistema fotovoltaico (CAMARGO et al., 2016; DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; GUERRERO-LEMUS et al., 2013; HE et al., 2017; HUO; ZHANG, 2012; JAMAL et al., 2017; JARACH, 1989; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LEE et al., 2012; LIU; LIN, 2019; LIU; XU; LIN, 2017; LIU;

PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; MADVAR et al., 2018; MAULEON, 2019; SHUAI et al., 2018; SU, 2013; SUEYOSHI; GOTO, 2014; SZABÓ; JÄGER-WALDAU; SZABÓ, 2010; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WALTERS; KAMINSKY; GOTTSCHAMER, 2018; WIJERATNE et al., 2019; YANG; ZOU, 2016; YU, H. J. J., 2018; ZHANG; GALLAGHER, 2016; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). A melhoria da tecnologia de células solares e a redução do custo de fabricação dos componentes do sistema podem promover o aprimoramento da capacidade instalada de energia fotovoltaica (LIU; PERNG; HO, 2013). De acordo com Kapoor et al. (2014), uma solução para redução do custo final do produto consiste na fabricação de módulos e células apoiada por mecanismos que reduzam o custo dos fatores de entrada. Na China, a redução nos custos de módulos FV e balanceamento do sistema são originários da fabricação doméstica de componentes e equipamentos. O país possui baixos custos de mão de obra e energia, fácil acesso à infraestrutura e promove financiamento de baixo custo sem impostos alfandegários (HUO; ZHANG, 2012). Portanto, preços baixos podem demarcar essa tecnologia como uma opção competitiva em termos de custo para geração de energia, mudando o paradigma do setor energético nos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento (DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018).

A margem de lucro da cadeia de suprimentos fotovoltaica, resultante dos custos reduzidos de operação, projeto e manutenção do sistema, representa outro fator determinante para a competitividade do setor (HE et al., 2017; LEE et al., 2012; LIU; LIN, 2019; LIU; XU; LIN, 2017; WIJERATNE et al., 2019; YU, H. J. J., 2018). A larga escala de produção de matéria-prima de silício, lingotes, células e módulos FV, a cadeia de suprimentos eficiente, a padronização e as margens de lucro fortemente reduzidas induzem a redução de preço dos sistemas, que pode ser ainda mais significativa tendo em vista as tecnologias utilizadas (SINKE, 2019). Em contrapartida, Jia, Sun e Koh (2016) afirmam que, se as empresas se diferenciarem de seus concorrentes, podem usar preços mais elevados com margens de lucro mais altas, sendo possível mitigar o poder de compradores e criar barreiras de entrada para concorrentes diretos. Ainda, salientam que as empresas *upstream* trabalham com maiores margens de lucro, visto o oligopólio do mercado, enquanto as empresas *midstream* operam com margens de lucro inferiores devido a baixas barreiras de entrada e competições acirradas.

Em decorrência dos outros fatores econômicos, a redução dos custos do cliente com energia representa uma importante fonte de vantagem competitiva para a geração FV distribuída

(CAMARGO et al., 2016; DOBROTKOVA; SURANA; AUDANA, 2018; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; GUERRERO-LEMUS et al., 2013; HE et al., 2017; JAMAL et al., 2017; JARACH, 1989; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; MADVAR et al., 2018; ROSA et al., 2018; SUEYOSHI; GOTO, 2014; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; WALTERS; KAMINSKY; GOTTSCHAMER, 2018; WIJERATNE et al., 2019; YANG; ZOU, 2016; YU, H. J. J., 2018; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). A competitividade da geração solar é aumentada devido ao custo reduzido dos componentes do sistema FV, e os usuários finais podem experimentar uma redução em suas contas de eletricidade em comparação com aqueles que não usam o sistema (YU, H. J. J., 2018). A difusão fotovoltaica é afetada pelo custo de outras fontes energéticas em países e regiões distintos. Se o custo de outras fontes de energia for mais alto e os custos de instalação de sistemas FV forem menores, maior é a probabilidade de as pessoas adotarem a geração de energia solar (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015). Neste contexto, destacam-se os esquemas energéticos comunitários, que têm sido impulsionados para abordar as questões relacionadas à energia em uma perspectiva baseada nas necessidades locais, contribuindo para a transição para fontes sustentáveis e a redução das contas de energia (KIAMBA; RODRIGUES; MARSH, 2017). Além disso, com a diminuição dos custos de produção e geração e a maturidade tecnológica, o período de retorno do investimento tende a diminuir e surge um mercado potencial de energia fotovoltaica, tornando o preço da energia mais competitivo (ZHANG; SHEN; CHAN, 2012).

### *3.3.2.2 Dimensão gerencial*

A adoção de estratégia de integração vertical consiste em uma decisão gerencial que pode trazer ganhos de competitividade em termos de custos dentro dos segmentos da cadeia de valor fotovoltaica (DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; LACASA; SHUBBAK, 2018; LIU; PERNG; HO, 2013; SU, 2013; YANG; ZOU, 2016; ZHANG; GALLAGHER, 2016). Essa estratégia busca adquirir e controlar segmentos de fabricação adicionais, aumentando os lucros e proporcionando maior segurança de suprimento de materiais aos fabricantes do setor (ZHANG; GALLAGHER, 2016). Liu, Perng e Ho (2013) complementam a informação afirmando que a integração vertical permite uma maior vantagem competitiva internacional devido à redução nos custos de geração de eletricidade. Assim, é possível

expandir o tamanho do mercado da indústria de energia renovável, promover uma cadeia de suprimentos completa e proporcionar um ambiente de desenvolvimento industrial adequado. Na China, o recrutamento de empreendedores qualificados e a aquisição de linhas de produção estrangeiras foram os principais canais de disseminação da tecnologia fotovoltaica, trazendo capacidade de inovação doméstica e garantindo um compartilhamento acelerado de conhecimentos entre os segmentos (LACASA; SHUBBAK, 2018).

O compartilhamento de infraestrutura e recursos de produção é apontado como outro fator gerencial que serve de base para o aumento da competitividade do setor fotovoltaico (FRATE; BRANNSTROM, 2017; GUERRERO-LEMUS et al., 2013; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KAPOOR et al., 2014; LO; WANG; HUANG, 2013; SHUAI et al., 2018; SZABÓ; JÄGER-WALDAU; SZABÓ, 2010; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). O efeito *cluster* da indústria FV permite que as empresas compartilhem os custos, a eficácia da infraestrutura e os recursos de produção necessários para obter vantagens competitivas e atender rapidamente às necessidades do mercado por meio de P&D colaborativo e aprendizado de inovação (LO; WANG; HUANG, 2013). Budzianowski et al. (2018) destacam que a infraestrutura de P&D criada pela indústria pode ser compartilhada com outras empresas, gerando inovações e reduzindo os custos gerais de P&D para a indústria e governo. Além disso, as empresas de manufatura e serviços que compartilham e usam de maneira eficiente os recursos podem criar benefícios para as comunidades locais, reduzir o impacto ambiental e melhorar o desempenho econômico das empresas e organizações envolvidas (BUTTURI et al., 2019).

A formação de alianças estratégicas representa uma fonte de vantagem competitiva para o setor FV, uma vez que permite o estabelecimento de conexões para discussão de políticas, programas de desenvolvimento de pesquisa e trocas de conhecimento (ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; JARACH, 1989; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; ROSA et al., 2018; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; YANG; ZOU, 2016). Sugandhavanija et al. (2011) destacam a importância dessas interações, afirmando que o conhecimento gerado pelas universidades pode beneficiar a indústria com a descoberta de novos materiais e tecnologias para aumentar a eficiência de células fotovoltaicas. Além da conexão entre universidade e indústria, identifica-se a necessidade de estabelecer relações com fornecedores de sistemas FV, agências ambientais, autoridades públicas, políticos, entidades do setor e mercado para ampliar

o compartilhamento de conhecimento em tecnologias de energia renovável e melhorar os processos de projeto, instalação, operação e manutenção dos sistemas (KAPOOR et al., 2014; ROSA et al., 2018; YANG; ZOU, 2016). Ainda, tendo em vista a composição da rede de interações de uma empresa, as oportunidades para melhorar a capacidade e a utilização de conhecimento contribuem positivamente para a realização do seu potencial de inovação (JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009).

Em um ambiente de rivalidade, marcado por diferentes padrões de produtos e tecnologias, o foco na diferenciação e inovação tecnológica constitui uma estratégia de caráter competitivo no cenário fotovoltaico (CAMARGO et al., 2016; CARSTENS; DA CUNHA, 2018; DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; LIN, 2019; LO; WANG; HUANG, 2013; MADVAR et al., 2018; ROSA et al., 2018; SU, 2013; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; YU, H. J. J., 2018; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). Ao adotarem essa estratégia, as empresas dedicam-se à pesquisa e desenvolvimento das tecnologias relacionadas à energia FV e concentram-se na diferenciação através do *marketing* dos seus principais produtos e do atendimento às mudanças do mercado (ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). Su (2013) afirma ainda que, para que as empresas liderem desenvolvimentos tecnológicos futuros, elas devem investir em tecnologias de próxima geração, acelerar a independência e a diferenciação das tecnologias FV e desenvolver e registrar patentes para novos tipos de componentes do sistema.

A capacitação de mão de obra em tecnologias fotovoltaicas é uma iniciativa que pode ser tomada pelas empresas para trazer ganhos de competitividade e difundir a geração distribuída desta fonte energética (CAMARGO et al., 2016; ELMUSTAPHA; HOPPE; HOPPE; BRESSERS, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; GUERRERO-LEMUS et al., 2013; HUO; ZHANG, 2012; JAMAL et al., 2017; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LACASA; SHUBBAK, 2018; LIU; PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; MADVAR et al., 2018; NYGAARD et al., 2017; QUITZOW; HUENTELER; ASMUSSEN, 2017; ROSA et al., 2018; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; TSOUTSOS et al., 2013; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WU; ZHOU, 2019; YANG; ZOU, 2016; ZHANG; GALLAGHER, 2016; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Como a mão de obra envolvida na instalação de sistemas FV é uma das principais preocupações dos clientes, é essencial o fornecimento de treinamentos aos

instaladores, engenheiros e técnicos para que eles obtenham conhecimento das características da tecnologia e desenvolvam habilidades para lidar com os clientes e trabalhar com o sistema FV (ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Tsoutsos et al. (2013) destacam ainda que o treinamento certificado de técnicos é um parâmetro importante para melhorar a qualidade e o desempenho das instalações fotovoltaicas, tendo impacto positivo na credibilidade e no crescimento da indústria FV.

O intercâmbio com especialistas e empresas externas é apontado como outro fator que influencia a difusão FV no contexto gerencial (CAMARGO et al., 2016; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; HUO; ZHANG, 2012; JAMAL et al., 2017; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LACASA; SHUBBAK, 2018; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; QUITZOW; HUENTELER; ASMUSSEN, 2017; SHUAI et al., 2018; SU, 2013; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; ZHANG; GALLAGHER, 2016). Lacasa e Shubbak (2018) destacam que geralmente as empresas interagem com outras organizações, realizando, apoiando ou complementando atividades tecnológicas e desenvolvendo capacidades necessárias para o aprendizado tecnológico nos países em desenvolvimento. Nesse contexto, a cooperação de diferentes atores na fabricação e nas aplicações de sistemas FV pode fornecer tecnologias avançadas, profissionais capacitados, mecanismos de conhecimento e gerenciamento, e a expansão dos benefícios sociais gerados pelas políticas fotovoltaicas (HUO; ZHANG, 2012). Na China, a migração de recursos humanos e as redes de empresas para interrelações e interconexões permitiram aos fabricantes e primeiros empreendedores do país obterem rapidamente o conhecimento tecnológico e as informações de mercado necessárias para que as capacidades de manufatura evoluíssem e as inovações de processo propiciassem economia de custos (ZHANG; GALLAGHER, 2016).

Em virtude dos fatores gerenciais citados, os processos de gestão qualificados representam uma fonte de vantagem competitiva para a geração distribuída de energia fotovoltaica (CAMARGO et al., 2016; HE et al., 2017; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; LIN, 2019; ROSA et al., 2018; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; TSOUTSOS et al., 2013; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019). Rosa et al. (2018) salientam que os gerentes devem analisar indicadores específicos para entenderem como os atores se comportam nas esferas estrutural e empresarial a fim de defenderem posições estratégicas no mercado. Ademais, é relevante que a gerência identifique os aspectos do

desempenho organizacional que devem ser gerenciados adequadamente para que a empresa obtenha desempenho competitivo (RIGO et al., 2019).

Com um processo de gestão estabelecido e consistente com a realidade da empresa, é possível executar atividades e desenvolver projetos de viabilidade econômica consistentes, fornecendo maior credibilidade aos clientes e contribuindo para a expansão da tecnologia FV (NYGAARD et al., 2017; ROSA et al., 2018). A viabilidade econômica das tecnologias de energia solar é um parâmetro essencial para o futuro das energias renováveis, permitindo a determinação de lucratividade, relação custo-benefício, taxa interna de retorno e período de retorno do investimento (GÜRTÜRK, 2019). Para isso, devem ser considerados fatores que podem mudar com o tempo e que são decisivos para a realização dos projetos e adoção FV, como a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada pela instalação de acordo com a estrutura local de custos atual ou prevista, legislação e aceitação da tecnologia (CAMARGO et al., 2016). Dessa forma, empresas que oferecem projetos consistentes a seus clientes permitem o desenvolvimento de um mercado de energia mais competitivo, beneficiando a sociedade em geral e abrindo novos setores de crescimento (LEE et al., 2016).

Serviços de relacionamento com o cliente e pós-venda implantados são atrativos e determinantes para auxiliar os consumidores na decisão de adotar a tecnologia fotovoltaica (ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; JARACH, 1989; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; LIN, 2019; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; YANG; ZOU, 2016). A existência desses serviços define como as empresas se relacionam com os clientes para construir confiança e aumentarem a participação de mercado (ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018). Além disso, as empresas devem treinar suas equipes acerca dos produtos e forma de instalação, inspirar confiança, ter boa comunicação com o cliente e fornecer atenção individualizada para obterem *feedback* positivo (VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014). Karakaya e Sriwannawit (2015) destacam que é relevante a oferta de serviço para monitoramento e manutenção dos sistemas após a venda para garantir a sustentabilidade do sistema.

A flexibilidade e a proatividade diante das necessidades dos consumidores são umas das principais vantagens competitivas das empresas fotovoltaicas (JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; LO; WANG; HUANG, 2013; ROSA et al., 2018; ZHANG; GALLAGHER, 2016). Esse fator consiste na velocidade da resposta das empresas às mudanças do mercado, derivada em grande parte do agrupamento de fornecedores de componentes do sistema em locais muito

próximos. Adicionalmente, engloba a capacidade de traduzir rapidamente novos projetos em produtos com preços acessíveis, inovando em processos, produtos e arquitetura de instalações (ZHANG; GALLAGHER, 2016). Jarach (1989) e Kapoor et al. (2014) destacam ainda que a oferta de garantia, por parte das empresas, na entrega, implantação e operação do sistema fotovoltaico fornece credibilidade e confiança aos clientes e investidores do sistema, constituindo outro fator determinante para competitividade. A oferta de garantia é fundamental para que os usuários estejam protegidos de eventuais falhas nos componentes do sistema, que podem levar a riscos inesperados de segurança, confiabilidade, eficiência reduzida e disponibilidade de eletricidade (MELLIT; TINA; KALOGIROU, 2018). Ademais, é importante implementar ferramentas de diagnóstico de falhas para garantir o desempenho ideal dos sistemas fotovoltaicos. Essas ferramentas permitem identificar com precisão e agilidade os fatores por trás dos mecanismos de perda de energia, reduzir os custos associados a operação, manutenção e tempo de inatividade do sistema e minimizar a probabilidade de os consumidores acionarem a garantia de seus sistemas devido à ocorrência de danos não identificados previamente (LIVERA et al., 2019).

A redução do tempo dos procedimentos entre pedido e operação dos sistemas fotovoltaicos é uma estratégia gerencial que influencia diretamente o volume de vendas e a satisfação do consumidor (LIU; PERNG; HO, 2013). Desse modo, as integradoras e as distribuidoras de energia elétrica devem considerar condições geográficas, padrões da rede elétrica, relacionamento com fornecedores, aspectos logísticos, necessidades regionais de carga e distância de transmissão de energia para reduzirem custos e tempo entre procedimentos a níveis que tornem o projeto atrativo para os investidores (SUEYOSHI; GOTO, 2014). Além disso, com o aumento da concorrência, o tempo acelerado de colocação do produto no mercado e os custos mais baixos tornaram-se críticos para o sucesso no desenvolvimento do setor (JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009).

### *3.3.2.3 Dimensão técnica*

As características arquitetônicas regionais favoráveis à instalação fotovoltaica são essenciais para que um número crescente de usuários adote a tecnologia e a torne mais competitiva (DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; ELMUSTAPHA; HOPPE; HOPPE; BRESSERS, 2018; HE et al., 2017; HUO; ZHANG, 2012; JAMAL et al., 2017;

KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; MAULEÓN, 2019; ROSA et al., 2018; SZABÓ; JÄGER-WALDAU; SZABÓ, 2010; WIJERATNE et al., 2019; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). Zhang, Shen e Chan (2012) afirmam que a disponibilidade de espaço para instalação e infraestrutura de serviço adequada é um facilitador para implantação de projetos fotovoltaicos, visto que os módulos precisam ser angulados na direção correta para maximizar a exposição solar. Além disso, as características físicas relacionadas aos materiais de construção normalmente utilizados em cada cidade afetam a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada a partir de sistemas FV instalados em telhados (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015). Wijeratne et al. (2019) apontam ainda que o terreno é um parâmetro essencial para instalação dos sistemas FV, pois impacta na distribuição da irradiação solar, na variabilidade da elevação, na orientação da superfície e nas sombras projetadas. Dessa forma, aspectos arquitetônicos favoráveis, aliados às características de modularidade e portabilidade dos módulos FV, possibilitam a ampliação do sistema e o aumento da capacidade instalada (JAMAL et al., 2017).

O interesse na redução das perdas de transmissão é apontado como outra fonte de vantagem competitiva de caráter técnico (HE et al., 2017; WIJERATNE et al., 2019). Quando a eletricidade é gerada por um sistema de geração distribuída de energia fotovoltaica, ela está muito próxima ao cliente e não precisa ser transportada por longas distâncias, perdendo, portanto, menos energia por meio do sistema de transmissão e distribuição (WIJERATNE et al., 2019). Essa proximidade entre a geração e o consumo de eletricidade é um excelente motivador para o desenvolvimento de esquemas energéticos comunitários, pois reduz as perdas na transmissão (BRUMMER, 2018). He et al. (2017) complementam a afirmação ao enfatizarem que a geração distribuída FV influencia a estabilidade e a programação de energia da rede, especialmente a taxa de perda da rede na transmissão e distribuição. Sendo assim, a redução de perdas de transmissão é um fator motivador para adotar os sistemas fotovoltaicos.

As características geográficas e climáticas favoráveis são fundamentais para a instalação dos sistemas FV e geração de energia elétrica (CAMARGO et al., 2016; DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; HE et al., 2017; HUO; ZHANG, 2012; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; XU; LIN, 2017; LIU; PERNG; HO, 2013; MADVAR et al., 2018; ROSA et al., 2018; SHUAI et al., 2018; SUEYOSHI; GOTO, 2014; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WALTERS;

KAMINSKY; GOTTSCHAMER, 2018; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019; YU, H. J. J., 2018; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). Um fator climatológico significativo para que mais energia solar seja convertida em energia elétrica é a radiação solar anual, crucial para a operação de um sistema fotovoltaico (LIU; XU; LIN, 2017). Além disso, fatores como altitude e temperatura média local devem ser considerados, uma vez que maiores altitudes e temperaturas mais baixas levam a um aumento na potência de saída e na eficiência de conversão do módulo FV (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; XU; LIN, 2017). Ainda, a latitude do local e a insolação são necessárias para determinar os ângulos de inclinação dos módulos e a tecnologia a ser utilizada em termos de eficiência (SUEYOSHI; GOTO, 2014). Sendo assim, o monitoramento da localização, orientação e inclinação do sistema FV e das condições climáticas locais é de relevância para que as unidades consumidoras sejam financeiramente sustentáveis e eficazes na geração de energia elétrica (ROSA et al., 2018).

Após identificar os aspectos técnicos que servem de base para a adoção fotovoltaica, a rede de P&D estabelecida para aprimoramento do sistema FV é apontada como outro fator relevante para determinar a competitividade do setor (CAMARGO et al., 2016; CARSTENS; DA CUNHA, 2018; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; HE et al., 2017; HUO; ZHANG, 2012; JAMAL et al., 2017; JARACH, 1989; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LACASA; SHUBBAK, 2018; LEE et al., 2017; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; MADVAR et al., 2018; NYGAARD et al., 2017; QUITZOW; HUENTELER; ASMUSSEN, 2017; SHUAI et al., 2018; SU, 2013; SUEYOSHI; GOTO, 2014; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; TSOUTSOS et al., 2013; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; YANG; ZOU, 2016; ZHANG; GALLAGHER, 2016; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). Liu, Perng e Ho (2013) ressaltam que a pesquisa e o desenvolvimento contínuos permitem melhorar a estabilidade do sistema FV e a criação de tecnologias de boa qualidade e baixo custo por meio do fortalecimento das relações de cooperação técnica internacionais. Nesse contexto, a indústria deve investir em pesquisa e desenvolvimento técnico para produzir tecnologias mais eficientes e econômicas e estabelecer soluções para detectar e corrigir falhas nos componentes dos sistemas FV (MADVAR et al., 2018). Su (2013) afirma que os Estados Unidos, o Japão e a Alemanha são pioneiros nos recursos de P&D do setor fotovoltaico, obtendo vantagens nas tecnologias, desenvolvendo rapidamente os mercados e expandindo a capacidade de produção nesse segmento. Nos últimos anos, entretanto, a China

aumentou significativamente os investimentos em P&D, tornando-se um importante *player* no cenário global de inovação e tendo crescentes registros de marcas e patentes no setor fotovoltaico (LACASA; SHUBBAK, 2018). Liu e Lin (2019) complementam a afirmação dizendo que a tecnologia FV foi iniciada e dominada por países desenvolvidos, e a China, embora atrasada, está atualmente em um período de vigoroso desenvolvimento.

Juntamente com a pesquisa e desenvolvimento de componentes fotovoltaicos, o atendimento aos requisitos técnicos e tecnológicos desempenha papel importante na expansão e competitividade desse mercado (LACASA; SHUBBAK, 2018; JARACH, 1989; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KAPOOR et al., 2014; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019; YU, H. J. J., 2018; ZHANG; GALLAGHER, 2016; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Dessa forma, é necessário cumprir os requisitos de projeto e os padrões de aceitação de equipamentos a fim de minimizar os riscos operacionais e de manutenção. Ademais, os padrões, normas e sistemas relevantes para cada elo de geração distribuída devem ser aprimorados para fornecerem uma base detalhada para as unidades de realização de trabalho, reduzindo os riscos da conexão à rede (WU; ZHOU, 2019). Wijeratne et al. (2019) destacam ainda a importância de atender aos indicadores de desempenho da construção no projeto e gerenciamento de sistemas fotovoltaicos para que os componentes suportem as combinações de carga máxima esperada e tenham riscos de falha reduzidos. Sendo assim, a conformidade com os regulamentos técnicos é fundamental para qualquer projeto FV, fornecendo segurança aos clientes e tornando a tecnologia mais atrativa.

A competência na instalação, operação e manutenção do sistema FV consiste em um aspecto técnico de grande relevância para que os consumidores sintam-se atraídos a investirem na tecnologia (DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; PERNG; HO, 2013; SZABÓ; JÄGER-WALDAU; SZABÓ, 2010; TSOUTSOS et al., 2013; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019; YANG; ZOU, 2016; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). É importante que os profissionais continuem desenvolvendo seus conhecimentos, buscando oportunidades de educação e prática e aprimorando as habilidades para aplicação, manutenção, reparo e substituição de sistemas fotovoltaicos (YANG; ZOU, 2016). Dessa forma, um maior conhecimento entre os profissionais resulta no aumento de empresas que oferecem serviços no setor, reduzindo os custos envolvidos na instalação e manutenção. Além

disso, instalação, operação e manutenção devem ser realizadas por profissionais qualificados para garantir que os regulamentos de construção sejam cumpridos e o sistema opere de maneira otimizada e segura, reduzindo a ocorrência de acidentes (WIJERATNE et al., 2019).

Em decorrência dos outros fatores técnicos, a produtividade na manufatura consiste em uma importante fonte de vantagem competitiva para a geração distribuída de energia fotovoltaica (GUERRERO-LEMUS et al., 2013; HE et al., 2017; JARACH, 1989; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; LIU; LIN, 2019; LO; WANG; HUANG, 2013; SU, 2013; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; TSOUTSOS et al., 2013; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Os ganhos de produtividade, causados pela melhoria da qualidade e da eficiência dos componentes FV, criam vantagens de escala e permitem o avanço da tecnologia industrial através da inovação em P&D e atualização tecnológica (LIU; LIN, 2019). O aumento na escala de produção permite a redução dos custos de fabricação de materiais fotovoltaicos (LO; WANG; HUANG, 2013) e pode ser obtido por meio do alinhamento institucional de empresas líderes, integrando os recursos ideais na cadeia da indústria e alcançando um grande número de remessas de componentes do sistema (ZOU et al., 2017).

A eficiência (DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; GUERRERO-LEMUS et al., 2013; HE et al., 2017; JAMAL et al., 2017; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LEE et al., 2017; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; ROSA et al., 2018; SU, 2013; SUEYOSHI; GOTO, 2014; TSOUTSOS et al., 2013; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WALTERS; KAMINSKY; GOTTSCHAMER, 2018; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019; YANG; ZOU, 2016; YU, H. J. J., 2018) e a longa vida útil dos sistemas fotovoltaicos (ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; GUERRERO-LEMUS et al., 2013; JAMAL et al., 2017; JARACH, 1989; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; LINU, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; ROSA et al., 2018; SUEYOSHI; GOTO, 2014; TSOUTSOS et al., 2013; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WALTERS; KAMINSKY; GOTTSCHAMER, 2018; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019; YANG; ZOU, 2016; YU, H. J. J., 2018) são fatores determinantes para a competitividade do setor e devem ser constantemente aprimoradas para aumentar a difusão dessa fonte renovável. A eficiência de conversão de energia é a porcentagem de energia solar incidente que a célula converte em eletricidade e representa o desempenho de um sistema fotovoltaico. Assim, aumentos na eficiência de conversão e vida útil dos componentes reduzem

o período de retorno do investimento e o custo de capital (YANG; ZOU, 2016). Dobrotkova, Surana e Audinet (2018) pontuam que melhorias de eficiência na fabricação FV global levam a um rápido declínio nos custos, tornando a tecnologia mais acessível. Ademais, com o avanço da tecnologia FV, cresce a demanda por esses sistemas nos países em desenvolvimento, requerendo pesquisas e criação de novas tecnologias para aumentar a eficiência e a durabilidade dos componentes do sistema e, conseqüentemente, a competitividade dessa fonte energética (GUERRERO-LEMUS et al., 2013).

Em virtude da atenção dada aos aspectos técnicos de qualidade, durabilidade e eficiência, os sistemas FV tendem a apresentar maior confiabilidade e estabilidade na geração de energia (DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; JAMAL et al., 2017; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; ROSA et al., 2018; SZABÓ; JÄGER-WALDAU; SZABÓ, 2010; TSOUTSOS et al., 2013; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WALTERS; KAMINSKY; GOTTSCHAMER, 2018; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019). Sistemas confiáveis, juntamente com estratégias de gerenciamento eficientes, podem enfrentar desafios naturais, como variações de temperatura, chuvas irregulares, sombreamento e mudanças na radiação solar, garantindo a confiabilidade da geração de eletricidade (JAMAL et al., 2017). É possível obter altos níveis de confiabilidade dos componentes FV realizando rigorosos testes de qualificação, que auxiliam a minimizar sua degradação e maximizar sua durabilidade e desempenho (SHARMA; CHANDEL, 2013). Desse modo, a geração distribuída de energia fotovoltaica é adequada para consumidores que têm necessidades de economia de energia e exigem alta confiabilidade no fornecimento de eletricidade (WU; ZHOU, 2019).

#### *3.3.2.4 Dimensão política e mercadológica*

No cenário político e mercadológico, um dos objetivos primários do governo é a redução de impactos ambientais, que pode ser alcançada através da inserção de fontes renováveis de energia, como a geração distribuída de energia fotovoltaica (CAMARGO et al., 2016; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; GUERRERO-LEMUS et al., 2013; HE et al., 2017; HUO; ZHANG, 2012; JAMAL et al., 2017; JARACH, 1989; KAPOOR et al., 2014; LEE et al., 2017; LIU; XU; LIN, 2017; LIU; PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; MADVAR et al., 2018; MAULEÓN, 2019; SHUAI

et al., 2018; SUEYOSHI; GOTO, 2014; SZABO; JAEGER-WALDAU; SZABO, 2010; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WALTERS; KAMINSKY; GOTTSCHAMER, 2018; WIJERATNE et al., 2019; YANG; ZOU, 2016; YU, H. J. J., 2018; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Embora uma porcentagem significativa da eletricidade mundial ainda seja gerada a partir de combustíveis fósseis, essa proporção vem diminuindo constantemente no decorrer dos anos, e os cenários para a transformação do sistema energético preveem que esse declínio continue até que a energia elétrica gerada por essas fontes desapareça (MAULEÓN, 2019). Para a redução de altas emissões de carbono, a instalação de sistemas FV para gerar eletricidade é uma opção atraente e passível de expansão, visto que é uma tecnologia de impacto reduzido para o meio ambiente e que propicia a melhoria da qualidade de vida (JAMAL et al. 2017). Dessa forma, o governo deve integrar investimentos em energia FV e informações técnicas para expandir o mercado, permitindo o desenvolvimento dessa fonte de energia de baixo impacto ambiental e obtendo uma vantagem competitiva internacional (LIU; PERNG; HO, 2013).

Outro interesse do governo consiste na geração de empregos para a sociedade, e pode ser idealizado através do desenvolvimento da indústria fotovoltaica (HE et al., 2017; MADVAR et al., 2018; SHUAI et al., 2018). Os empregos diretos criados pelo crescimento do setor estão relacionados à construção, instalação e manutenção dos sistemas FV, enquanto os indiretos estão relacionados aos criados em instituições como universidades, seguradoras e bancos (MADVAR et al., 2018). Conforme Fragkos e Paroussos (2018), o desenvolvimento dos setores de energia renovável levou a um caminho de crescimento econômico sustentável, constituindo uma importante iniciativa política para reduzir o desemprego. De acordo com Muniyoor (2020), cerca de 11 milhões de empregos diretos e indiretos foram criados em todo o mundo em 2018 para atender às cadeias de suprimentos de diversas tecnologias de energia renovável, sendo a energia fotovoltaica a principal fonte de geração de empregos. Além disso, aproximadamente 70% dos empregos em energia limpa são oferecidos pela China, Índia, Alemanha, Brasil, Estados Unidos e Japão, observando que 2,2 milhões de pessoas são empregadas apenas no segmento fotovoltaico chinês (IRENA, 2019).

A busca por segurança energética e independência de combustíveis fósseis é identificada como um fator impulsionador para a competitividade do setor FV, levando ao desenvolvimento e expansão da tecnologia (CAMARGO et al., 2016; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LEE et al., 2017; SHUAI et al., 2018; SU, 2013; SUEYOSHI; GOTO, 2014; TSOOTSOS et

al., 2013). Embora a segurança energética não seja uma política, mas um conceito, ela reflete claramente intenções estratégicas da política para manter seguro o suprimento de eletricidade a preços acessíveis (HAMED; BRESSLER, 2019). Sendo assim, os governos buscam a diversificação das fontes de energia, com a geração fotovoltaica sendo vista como uma alternativa realista e neutra em carbono para atingir as metas de segurança energética. Além disso, embora a tecnologia FV dependa de importações na fase de desenvolvimento, ela pode ser utilizada sem suprimentos externos nas etapas subsequentes, permitindo um aumento na energia produzida pelos países e uma menor dependência das importações (NOVIKAU, 2019).

Os principais interesses do governo relacionados ao setor energético podem ser concretizados através de iniciativas como a criação de políticas de desenvolvimento da indústria fotovoltaica local (CAMARGO et al., 2016; CARSTENS; DA CUNHA, 2018; DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; HUO; ZHANG, 2012; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LACASA; SHUBBAK, 2018; LEE et al., 2017; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; MADVAR et al., 2018; NYGAARD et al., 2017; QUITZOW; HUENTELER; ASMUSSEN, 2017; SHUAI et al., 2018; SU, 2013; SUEYOSHI; GOTO, 2014; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; TSOUTSOS et al., 2013; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019; YU, H. J. J., 2018; ZHANG; GALLAGHER, 2016; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). Medidas de apoio à produção local foram sugeridas e implementadas por diversos países com o objetivo de redução de preços, geração de renda, criação de empregos e novas indústrias (NYGAARD et al., 2017). Na China, os governos provinciais e locais forneceram incentivos políticos para apoiar a fabricação local de componentes de energia FV, que consistia em reembolso de taxas de transferência de terras, reembolso parcial do imposto de renda das empresas e fornecimento de eletricidade a baixo custo para aumentar o Produto Interno Bruto (PIB) local (ZHANG; GALLAGHER, 2016). Lo, Wang e Huang (2013) enfatizam ainda que os governos devem adotar programas de expansão do mercado para aumentar a difusão FV e o desenvolvimento sustentável. Ademais, os investimentos no mercado doméstico são essenciais para o desenvolvimento de capacidades industriais em produtos complexos (QUITZOW; HUENTELER; ASMUSSEN, 2017), e o fortalecimento da pesquisa e desenvolvimento pode aumentar as exportações de componentes FV, elevando a competitividade do setor nos mercados local e internacional (SHUAI et al., 2018).

Programas globais de incentivo ao desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica correspondem a outro fator que influencia significativamente a competitividade e difusão do setor (CAMARGO et al., 2016; CARSTENS; DA CUNHA, 2018; DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; HE et al., 2017; HUO; ZHANG, 2012; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LEE et al., 2012; LIU; LIN, 2019; LO; WANG; HUANG, 2013; MADVAR et al., 2018; MAULEÓN, 2019; NYGAARD et al., 2017; QUITZOW; HUENTELER; ASMUSSEN, 2017; ROSA et al., 2018; SU, 2013; SUEYOSHI; GOTO, 2014; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; TSOUTSOS et al., 2013; WIJERATNE et al., 2019; YANG; ZOU, 2016; YU, H. J. J., 2018; ZHANG; GALLAGHER, 2016; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). As iniciativas de subsídios para P&D no setor FV permitem que as empresas se conectem internacionalmente para trocarem conhecimentos e experiências e promoverem a globalização da ciência no contexto energético (ZHANG; GALLAGHER, 2016). Kapoor et al. (2014) afirmam que a criação de fundos nacionais para incentivar P&D na área de energia FV pode capacitar recursos humanos a níveis nacional e regional e proporcionar o crescimento contínuo da tecnologia. Além disso, os programas públicos de P&D podem fornecer uma imagem geral do progresso da tecnologia, através da utilização de instrumentos de pesquisa, conhecimento e capacidades intelectuais, e orientar as equipes a trabalharem de forma conjunta em objetivos específicos para redução de custos de geração (HUO; ZHANG, 2012).

A criação de sistemas de subsídios financeiros para geração de energia fotovoltaica está entre os fatores políticos que impactam na competitividade desse segmento energético (CAMARGO et al., 2016; DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; HUO; ZHANG, 2012; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; MADVAR et al., 2018; NYGAARD et al., 2017; SU, 2013; SUEYOSHI; GOTO, 2014; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019; YANG; ZOU, 2016; YU, H. J. J., 2018; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). No Taiwan, políticas e subsídios financeiros foram formulados pelo governo para incentivarem usuários comerciais e residenciais a instalarem sistemas FV, bem como para auxiliarem no desenvolvimento de uma cidade solar (LIU; PERNG; HO, 2013). O governo chinês subsidiou

iniciativas de industrialização da tecnologia FV para promover a participação do país nesse mercado, minimizando o risco associado aos projetos e incentivando as empresas a explorarem o mercado interno para reduzirem a dependência de importações (ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). Em países africanos, como Mali, Quênia, Costa do Marfim e Senegal, foram propostas medidas como a isenção de impostos para importação de componentes do sistema FV a fim de promover a difusão da energia solar fotovoltaica (NYGAARD et al., 2017). Na Argentina, incentivos econômicos e fiscais, subsídios e outras políticas públicas são destacados como aspectos fundamentais para adoção da tecnologia FV (CAMARGO et al., 2016). Em Hong Kong, foi sugerido que o governo concedesse subsídios aos usuários como compensação aos altos custos iniciais de instalação e manutenção e incentivasse as empresas a adotarem sistemas FV em novos projetos (ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Assim, destaca-se que os apoios político e governamental são essenciais no desenvolvimento do setor fotovoltaico (MADVAR et al., 2018).

Juntamente com as políticas de subsídios financeiros e de desenvolvimento da indústria fotovoltaica, políticas de formação de mercado estável, previsível, transparente e de médio a longo prazo são fundamentais para o fortalecimento do setor (CAMARGO et al., 2016; CARSTENS; DA CUNHA, 2018; GUERRERO-LEMUS et al., 2013; HUO; ZHANG, 2012; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LACASA; SHUBBAK, 2018; LEE et al., 2017; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; MADVAR et al., 2018; MAULEÓN, 2019; QUITZOW; HUENTELER; ASMUSSEN, 2017; SHUAI et al., 2018; SU, 2013; SUEYOSHI; GOTO, 2014; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; TSOUTSOS et al., 2013; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019; YANG; ZOU, 2016; YU, H. J. J., 2018; ZHANG; GALLAGHER, 2016; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012; ZHAO; ZHANG; ZUO, 2011). De acordo com Liu, Perng e Ho (2013), as estratégias de apoio do governo podem propiciar a criação de alianças estratégicas para expandir o mercado e promover uma cadeia de suprimentos completa, permitindo redução de custos e ganhos de escala. Os incentivos de mercado devem proporcionar aos investidores lucros razoáveis em energias renováveis (HUO; ZHANG, 2012) e precisam estar alinhados com uma variedade de novas oportunidades tecnológicas e com sistemas de inovação emergentes para expandir o mercado (LO; WANG; HUANG, 2013). Além disso, a estruturação do mercado promove o crescimento das

exportações fotovoltaicas, provoca transformações nas políticas energéticas e estabelece o desenvolvimento de uma indústria internacionalmente competitiva (SHUAI et al., 2018).

O desenvolvimento de políticas de formação de mercado e de criação de subsídios financeiros para geração FV pode levar ao aumento do PIB, à criação de empregos e ao crescimento da economia local (HE et al., 2017; ZHANG; GALLAGHER, 2016). Para que o potencial da geração distribuída fotovoltaica cresça, a demanda por eletricidade deve ser alta para apoiar o desenvolvimento econômico em países onde o PIB está crescendo rapidamente (HE et al., 2017). Assim, a situação econômica de um país influencia a quantidade de recursos que podem ser alocados para a implantação de energias renováveis, destacando que os países desenvolvidos têm maior probabilidade de adotar sistemas fotovoltaicos (GARCÍA-ÁLVAREZ; CABEZA-GARCÍA; SOARES, 2018). Além disso, essa fonte energética exige políticas de apoio para seu crescimento contínuo e tem se tornado uma proposta de negócio para investidores, contribuindo para os desenvolvimentos econômico, social e ambiental (KAPOOR et al., 2014). Nesse contexto, destacam-se os modelos de negócios de energia comunitária, inicialmente empregados no cenário de energia solar na Alemanha e no Reino Unido, e que têm como um dos principais objetivos a geração de renda para as comunidades locais (NOLDEN; BARNES; NICHOLLS, 2020).

O papel dos formuladores de políticas pode ser significativo para a difusão fotovoltaica, ajudando a reduzir a incerteza sobre os investimentos, permitindo o aprendizado contínuo com o crescimento do mercado e racionalizando procedimentos administrativos e barreiras de mercado (DOBROTKOVA; SURANA; AUDINET, 2018; LACASA; SHUBBAK, 2018; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; MAULEON, 2019; SHUAI et al., 2018; SU, 2013; SUEYOSHI; GOTO, 2014; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; TSOUTSOS et al., 2013; WU; ZHOU, 2019; ZHANG; GALLAGHER, 2016; ZHANG; SHEN; CHAN, 2012). Sugandhavanija et al. (2011) afirmam que a burocracia e a inflexibilidade nos procedimentos administrativos podem levar a atrasos na execução de contratos e projetos. Dessa forma, barreiras administrativas mínimas constituem parte importante da política energética para que seja obtido um aumento bem-sucedido nas taxas de crescimento da capacidade instalada de energia fotovoltaica (SUEYOSHI; GOTO, 2014). Ainda, a ausência ou redução de barreiras à entrada de equipamentos nos países possibilita que as empresas adquiram inovações em energias limpas e comecem a fabricar os componentes FV, expandindo

rapidamente sua capacidade de produção para atenderem à demanda crescente (ZHANG; GALLAGHER, 2016).

Na dimensão política e mercadológica, outro fator a ser considerado pelos formuladores de políticas para o desenvolvimento sustentável, aumento da capacidade instalada de energias renováveis e da competitividade do setor fotovoltaico é a criação de abordagens estratégicas para conscientização pública e disseminação da tecnologia FV (CAMARGO et al., 2016; CARSTENS; DA CUNHA, 2018; ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; JARACH, 1989; JAYANTHI; WITT; SINGH, 2009; KAPOOR et al., 2014; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; LIN, 2019; LIU; PERNG; HO, 2013; LO; WANG; HUANG, 2013; MADVAR et al., 2018; ROSA et al., 2018; SU, 2013; SUEYOSHI; GOTO, 2014; SUGANDHAVANIJA et al., 2011; SZABO; JAEGER-WALDAU; SZABO, 2010; TSOUTSOS et al., 2013; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; WALTERS; KAMINSKY; GOTTSCHAMER, 2018; WIJERATNE et al., 2019; YANG; ZOU, 2016; YU, H. J. J., 2018). Desse modo, identifica-se a necessidade de campanhas educacionais para comunicar os benefícios econômicos, ambientais e sociais que podem ser obtidos com a instalação dos sistemas FV e conscientizar a população sobre a importância da geração de eletricidade a partir de fontes renováveis (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015). Elmustapha, Hoppe e Bressers (2018) corroboram essa afirmação ao dizerem que a implementação de políticas associadas a estratégias de *marketing* e à confiança do consumidor em programas de incentivo é impulsionadora para a difusão da tecnologia fotovoltaica. Além disso, Walters, Kaminsky e Gottschamer (2018) salientam que um provável ponto de alavancagem da difusão FV se concentraria em tornar as informações mais acessíveis aos clientes através de mecanismos de divulgação, uma vez que consumidores conscientes das condições favoráveis a esse tipo de geração apresentam maior probabilidade de adotar a tecnologia.

A existência de padrões técnicos para aplicações fotovoltaicas fornece maior confiabilidade e segurança para os investidores e deve constar nas regulações políticas a fim de que a adoção FV ocorra em larga escala (ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; HUO; ZHANG, 2012; JAMAL et al., 2017; JARACH, 1989; KAPOOR et al., 2014; NYGAARD et al., 2017; SUEYOSHI; GOTO, 2014; TSOUTSOS et al., 2013; WIJERATNE et al., 2019; WU; ZHOU, 2019; ZHANG; SHEN ; CHAN, 2012). De acordo com Zhang, Shen e Chan (2012), é necessário projetar códigos e regulamentos específicos relativos à confiabilidade dos sistemas

FV, deixando claras as responsabilidades dos desenvolvedores, proprietários, fornecedores, empreiteiros e departamentos públicos. Além disso, a conformidade com os códigos e regulamentos de construção relevantes é fundamental para os projetos FV, que devem seguir padrões de fabricação e instalação, regulações para dispositivos de conexão para módulos solares, requisitos de segurança para matrizes FV, bem como padrões de construção de acordo com a localização da unidade consumidora (WIJERATNE et al., 2019). Dessa forma, o governo é visto como suficientemente poderoso para influenciar a adoção de fontes de geração de energia limpa através da implementação de normas rígidas que possibilitam a redução da incerteza acerca da tecnologia (ELMUSTAPHA; HOPPE; BRESSERS, 2018; NASCIMENTO et al., 2020).

Os países que desenvolvem aplicações de energia renovável variam de acordo com as condições de desenvolvimento econômico, a estrutura energética e o desenvolvimento de enfoque técnico, que visa disponibilizar mão de obra qualificada em instalação e assistência técnica como estratégia para aumentar a adoção fotovoltaica (FRATE; BRANNSTROM, 2017; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015; LIU; PERNG; HO, 2013; ROSA et al., 2018; SZABO; JAEGER-WALDAU; SZABO, 2010; YANG; ZOU, 2016). Karakaya e Sriwannawit (2015) afirmam que os países precisam desenvolver capacidade técnica para promover a ampla adoção da tecnologia, uma vez que o mercado FV está concentrado nas grandes cidades e não atende áreas remotas com eficiência se a infraestrutura for inadequada. Destaca-se ainda que uma tendência importante é que a prestação de amplo suporte técnico se torne o foco da política de difusão, especialmente para aqueles que vislumbram um grande crescimento do uso de energia FV em um futuro próximo (MAH et al., 2018).

### 3.4 CONCLUSÕES

A identificação de elos que compõem a cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica e dos fatores que influenciam a competitividade do setor é um ponto chave para a difusão dessa tecnologia. Por meio desta revisão sistemática da literatura, verificou-se que os atores e fatores se concentram em diversas esferas e apresentam um caráter complexo, com relações de dependência estabelecidas desde a etapa de fabricação de matérias-primas até a desativação do sistema fotovoltaico. A análise dos 94 estudos relacionados à temática permitiu o desenvolvimento de uma cadeia de valor detalhada e única, englobando diferentes definições

usualmente aceitas pela literatura e apresentando uma configuração ampliada das estruturas existentes. Além disso, 41 fatores foram extraídos para explicar e determinar a competitividade do setor FV, agrupados nas dimensões econômica, gerencial, técnica, política e mercadológica para fins de análise e discussão.

A cadeia de valor construída foi classificada nos segmentos *upstream*, *midstream*, *downstream* e auxiliar a fim de englobar todas as atividades realizadas por diferentes atores desde a produção de materiais necessários para a instalação do sistema FV até a entrega aos consumidores finais e subsequente desativação e descarte no fim de sua vida útil. Verificou-se que a cadeia *upstream* envolve conhecimentos específicos e alta capacidade tecnológica, criando maior valor agregado e obtendo os maiores lucros dentro da indústria FV global. Já o setor *midstream* apresenta menores barreiras de entrada, alta concorrência e baixo valor agregado, atingindo menores lucros na cadeia de valor. Enquanto isso, o setor *downstream* requer adaptações incrementais de soluções a novas oportunidades tecnológicas nos mercados globais, apresenta baixas barreiras de entrada e intensa concorrência de preços, dependendo de políticas de conscientização e redução de custos para condução dos negócios. Na cadeia de valor auxiliar, são identificadas as atividades essenciais que apoiam a estrutura principal e permitem a interação de empresas, instituições acadêmicas e governo para troca de conhecimentos técnicos e informações de mercado, possibilitando que o setor fotovoltaico se posicione de forma competitiva frente à concorrência.

Em toda a extensão da cadeia de valor, são identificadas interações entre diferentes atores, que desempenham papéis cruciais para que o setor fotovoltaico se desenvolva e assuma participação significativa na matriz elétrica mundial. Sendo assim, os *stakeholders* devem estar atentos a fatores econômicos, gerenciais, técnicos, políticos e mercadológicos para que a geração distribuída de energia fotovoltaica se torne uma opção viável e atraente para os investidores, permanecendo um mercado em expansão. No contexto econômico, é essencial que os bancos e instituições financeiras disponibilizem sistemas de financiamento para a adoção da tecnologia FV e que a população atribua valor significativo ao desenvolvimento econômico sustentável para que os custos dos clientes com energia sejam reduzidos, influenciando diretamente a tomada de decisão acerca do investimento. Sob o ponto de vista gerencial, destaca-se a necessidade de as empresas estabelecerem alianças estratégicas, capacitarem sua equipe, fornecerem serviços de relacionamento com os clientes e apresentarem flexibilidade

frente à demanda. Dessa forma, as chances de conquistarem a confiança dos consumidores e aumentarem a quantidade de sistemas FV instalados crescem significativamente.

Na dimensão técnica, as empresas devem estabelecer uma rede de pesquisa e desenvolvimento em conjunto com instituições acadêmicas a fim de que os sistemas FV sejam aprimorados em termos de eficiência, qualidade e confiabilidade. Além disso, os serviços de fabricação, instalação, operação e manutenção dos sistemas devem ser realizados por profissionais capacitados para que os clientes se sintam seguros quanto à adoção da tecnologia e obtenham os benefícios da geração de energia de uma fonte ambientalmente amigável. Sob as perspectivas política e mercadológica, ressalta-se a importância de os formuladores de políticas estabelecerem programas globais de incentivo ao desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica para redução de impactos ambientais, geração de novos empregos e garantia de segurança energética à sociedade. Ademais, o governo deve racionalizar procedimentos administrativos e reduzir barreiras ao mercado FV, criar abordagens estratégicas para conscientização pública e estimular o crescimento da economia para que essa fonte renovável se desenvolva continuamente e se torne uma proposta de negócio para investidores, contribuindo para os progressos econômico e social e melhorando a qualidade de vida da população.

Com o mapeamento da cadeia de valor fotovoltaica e dos fatores determinantes para a competitividade do setor, verifica-se a relevância de um estudo futuro que identifique a importância de cada fator junto a cada elo da cadeia. Nesse sentido, destacam-se a utilização de uma abordagem para verificar a perspectiva de cada segmento da cadeia de valor sobre os fatores que influenciam sua posição competitiva e a proposta de um modelo de diagnóstico de competitividade que acesse os diferentes atores. Esse diagnóstico pode indicar os principais fatores e elos a serem trabalhados para que a geração distribuída de energia fotovoltaica seja difundida de forma crescente e competitiva diante das outras fontes energéticas.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [números de concessão 142448/2018-4, 308723/2017-1, 311926/2017-7 e 465640/2014-1], Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) [número de concessão 23038.000776/2017-54] e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado

do Rio Grande do Sul (FAPERGS) [número de concessão 17/2551-0000517-1]. Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPERGS e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Geração Distribuída (INCT-GD) por apoiarem esta pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

AGNEW, S.; SMITH, C.; DARGUSCH, P. Causal loop modelling of residential solar and battery adoption dynamics: A case study of Queensland, Australia. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2363–2373, 2018.

ALY, A. et al. Barriers to Large-scale Solar Power in Tanzania. **Energy for Sustainable Development**, v. 48, p. 43–58, 2019.

ANKIT et al. Review and comparative study of single-stage inverters for a PV system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 962–986, 2018.

AQEEQ, M. A. et al. On the competitiveness of grid-tied residential photovoltaic generation systems in Pakistan: Panacea or paradox? **Energy Policy**, v. 119, p. 704–722, 2018.

ARORA, N. et al. **Greening the Solar PV value chain**. New Delhi: European Union's Resource Efficiency Initiative (EU-REI) Project, 2018. Disponível em: <<https://www.teriin.org/sites/default/files/2018-09/greening-solar-PV-value-chain.pdf>>.

Acesso em: 28 ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14519:2011: Medidores eletrônicos de energia elétrica – Especificação**. Brasil, 2011.

BESIOU, M.; VAN WASSENHOVE, L. N. Closed-Loop Supply Chains for Photovoltaic Panels: A Case-Based Approach. **Journal of Industrial Ecology**, v. 20, n. 4, p. 929–937, 2016.

BRUMMER, V. Community energy – benefits and barriers: A comparative literature review of Community Energy in the UK, Germany and the USA, the benefits it provides for society and the barriers it faces. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 187-196, 2018.

BUDZIANOWSKI, W. M. et al. Business models and innovativeness of potential renewable energy projects in Africa. **Renewable Energy**, v. 123, p. 162–190, 2018.

BUTTURI, M. A. et al. Renewable energy in eco-industrial parks and urban-industrial symbiosis: A literature review and a conceptual synthesis. **Applied Energy**, v. 255, p. 113825, 2019.

CAMARGO, L. R. et al. Technical, Economical and Social Assessment of Photovoltaics in the

- Frame of the Net-Metering Law for the Province of Salta, Argentina. **Energies**, v. 9, n. 3, p. 133, 2016.
- CAMARINHA-MATOS, L. M. et al. Collaborative services provision for solar power plants. **Industrial Management and Data Systems**, v. 117, n. 5, p. 946–966, 2017.
- CARSTENS, D. D. S.; DA CUNHA, S. K. Solar energy growth in Brazil: Essential dimensions for the technological transition. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 8, n. 4, p. 293–302, 2018.
- CASTELLANOS, S. et al. Sustainable silicon photovoltaics manufacturing in a global market: A techno-economic, tariff and transportation framework. **Applied Energy**, v. 212, p. 704–719, 2018.
- CHATZISIDERIS, M. D. et al. Ecodesign perspectives of thin-film photovoltaic technologies: A review of life cycle assessment studies. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 156, p. 2–10, 2016.
- CHEN, Z.; SU, S.-I. I. Photovoltaic supply chain coordination with strategic consumers in China. **Renewable Energy**, v. 68, p. 236–244, 2014.
- CORCELLI, F. et al. Transforming rooftops into productive urban spaces in the Mediterranean. An LCA comparison of agri-urban production and photovoltaic energy generation. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 144, p. 321–336, 2019.
- CURTIUS, H. C. The adoption of building-integrated photovoltaics: barriers and facilitators. **Renewable Energy**, v. 126, p. 783–790, 2018.
- DA SILVA, P. P. et al. Photovoltaic distributed generation – An international review on diffusion, support policies, and electricity sector regulatory adaptation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 30–39, 2019.
- DOBROTKOVA, Z.; SURANA, K.; AUDINET, P. The price of solar energy: Comparing competitive auctions for utility-scale solar PV in developing countries. **Energy Policy**, v. 118, p. 133–148, 2018.
- ELMUSTAPHA, H.; HOPPE, T.; BRESSERS, H. Understanding *Stakeholders' Views* and the Influence of the Socio-Cultural Dimension on the Adoption of Solar Energy Technology in Lebanon. **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 1–17, 2018.
- ESKEW, J. et al. An environmental Life Cycle Assessment of rooftop solar in Bangkok, Thailand. **Renewable Energy**, v. 123, p. 781–792, 2018.
- Electronics, Sensors, Photonics Knowledge Transfer Network (ESP KTN). **UK Solar**

- Photovoltaic Roadmap: A Strategy for 2020.** Reino Unido: ESP KTN, 2013. Disponível em: <[https://www.bre.co.uk/filelibrary/nsc/Documents Library/Not for Profits/KTN\\_Report\\_Solar-PV-roadmap-to-2020\\_1113.pdf](https://www.bre.co.uk/filelibrary/nsc/Documents/Library/Not_for_Profits/KTN_Report_Solar-PV-roadmap-to-2020_1113.pdf)>. Acesso em: 26 ago. 2021.
- FARIAS, L. M. S. et al. Criteria and practices for lean and green performance assessment: Systematic review and conceptual framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 746–762, 2019.
- FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181–191, 2018.
- FRAGKOS, P.; PAROUSSOS, L. Employment creation in EU related to renewables expansion. **Applied Energy**, v. 230, p. 935–945, 2018.
- FRATE, C. A.; BRANNSTROM, C. *Stakeholder* subjectivities regarding barriers and drivers to the introduction of utility-scale solar photovoltaic power in Brazil. **Energy Policy**, v. 111, p. 346–352, 2017.
- FUNCKE, S. Municipal Added Value through Solar Power Systems in the City of Freiburg. **Sustainability**, v. 4, n. 5, p. 819–839, 2012.
- GARCÍA-ÁLVAREZ, M. T.; CABEZA-GARCÍA, L.; SOARES, I. Assessment of energy policies to promote photovoltaic generation in the European Union. **Energy**, v. 151, p. 864–874, 2018.
- GARLET, T. B. et al. Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 157–169, 2019.
- GARZA-REYES, J. A. Lean and green – a systematic review of the state of the art literature. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 18–29, 2015.
- GÖLZ, S.; WEDDERHOFF, O. Explaining regional acceptance of the German energy transition by including trust in *stakeholders* and perception of fairness as socio-institutional factors. **Energy Research and Social Science**, v. 43, p. 96–108, 2018.
- GRAU, T.; HUO, M.; NEUHOFF, K. Survey of photovoltaic industry and policy in Germany and China. **Energy Policy**, v. 51, p. 20–37, 2012.
- GUERRERO-LEMUS, R. et al. Technical and socio-economic assessment for a Si-based low-cost solar cells factory in West Africa. **Renewable Energy**, v. 57, p. 506–511, 2013.
- GUERRERO-LIQUET, G. C. et al. Determination of the Optimal Size of Photovoltaic Systems by Using Multi-Criteria Decision-Making Methods. **Sustainability**, v. 10, n. 12, 2018.

- GÜRTÜRK, M. Economic feasibility of solar power plants based on PV module with levelized cost analysis. **Energy**, v. 171, p. 866–878, 2019.
- HALEY, U. C. V.; SCHULER, D. A. Government Policy and Firm Strategy in the Solar Photovoltaic Industry. **California Management Review**, v. 54, n. 1, p. 17-38, 2011.
- HAMED, T. A.; BRESSLER, L. Energy security in Israel and Jordan: The role of renewable energy sources. **Renewable Energy**, v. 135, p. 378–389, 2019.
- HE, L. et al. Core Abilities Evaluation Index System Exploration and Empirical Study on Distributed PV-Generation Projects. **Energies**, v. 10, n. 12, p. 2083, 2017.
- HERNÁNDEZ-CALLEJO, L.; GALLARDO-SAAVEDRA, S.; ALONSO-GÓMEZ, V. A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. **Solar Energy**, v. 188, p. 426-440, 2019.
- HIPP, A.; BINZ, C. Firm survival in complex value chains and global innovation systems: Evidence from solar photovoltaics. **Research Policy**, v. 49, n. 1, p. 103876, 2020.
- HOLTORF, H. et al. A model to evaluate the success of Solar Home Systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 245–255, 2015.
- HU, J. L.; YEH, F. Y. The Value Migration and Innovative Capacity of Taiwan’s Photovoltaic Industry. **Energy Sources Part B - Economics Planning and Policy**, v. 8, n. 2, p. 190–199, 2013.
- HUO, M.; ZHANG, D. Lessons from photovoltaic policies in China for future development. **Energy Policy**, v. 51, p. 38–45, 2012.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Technology Roadmap: Solar photovoltaic energy**. Paris: IEA, 2010. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy-2010>>. Acesso: 28 ago. 2021.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Energy and Jobs - Annual Review 2019**. Abu Dhabi, 2019. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2019/Jun/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2019>>. Acesso em: 10 jan. 2020.
- JAEGERSBERG, G.; URE, J. Barriers to knowledge sharing and *stakeholder* alignment in solar energy clusters: Learning from other sectors and regions. **Journal of Strategic Information Systems**, v. 20, n. 4, p. 343–354, 2011.
- JAHN, U. et al. Managing technical risks in PV investments: How to quantify the impact of risk mitigation measures for different PV project phases? **Progress in Photovoltaics**, v. 26, n.

8, p. 597–607, 2018.

JAMAL, T. et al. Technical challenges of PV deployment into remote Australian electricity networks: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 1309–1325, 2017.

JARACH, M. An overview of the literature on barriers to the diffusion of renewable energy sources in agriculture. **Applied Energy**, v. 32, n. 2, p. 117–131, 1989.

JAYANTHI, S.; WITT, E. C.; SINGH, V. Evaluation of Potential of Innovations: A DEA-Based Application to US Photovoltaic Industry. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 56, n. 3, p. 478–493, 2009.

JIA, F.; SUN, H.; KOH, L. Global solar photovoltaic industry: an overview and national competitiveness of Taiwan. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 550–562, 2016.

JUNTUNEN, J. K.; HYYSALO, S. Renewable micro-generation of heat and electricity—Review on common and missing socio-technical configurations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 857–870, 2015

KAPOOR, K. et al. Evolution of solar energy in India: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 475–487, 2014.

KARAKAYA, E.; SRIWANNAWIT, P. Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 60–66, 2015.

KEIRSTEAD, J. The UK domestic photovoltaics industry and the role of central government. **Energy Policy**, v. 35, n. 4, p. 2268–2280, 2007.

KIAMBA, L.; RODRIGUES, L. T.; MARSH, J. Community energy schemes: the role of public participation and engagement. **Passive and Low Energy Architecture (PLEA)**, 2017.

KIM, I.-P.; HWANG, H. S.; JUNG, J.- W. Conflict cause analysis between *stakeholders* in a utility-scale PV plant and its policy improvement methods in Korea. **Energy Policy**, v. 121, p. 452–463, 2018.

KIM, K.; LEE, S. How Can Big Data Complement Expert Analysis? A Value Chain Case Study. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 709, 2018.

KLITKOU, A.; COENEN, L. The Emergence of the Norwegian Solar Photovoltaic Industry in a Regional Perspective. **European Planning Studies**, v. 21, n. 11, p. 1796–1819, 2013.

KOURKOUMPAS, D.-S. et al. A review of key environmental and energy performance indicators for the case of renewable energy systems when integrated with storage solutions. **Applied Energy**, v. 231, p. 380–398, 2018.

LACASA, I. D.; SHUBBAK, M. H. Drifting towards innovation: The co-evolution of patent

networks, policy, and institutions in China's solar photovoltaics industry. **Energy Research and Social Science**, v. 38, p. 87–101, 2018.

LACERDA, J. S.; VAN DEN BERGH, J. C. J. M. Diversity in solar photovoltaic energy: Implications for innovation and policy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 331–340, 2016.

LEE, A. H. I. et al. An integrated performance evaluation model for the photovoltaics industry. **Energies**, v. 5, n. 4, p. 1271–1291, 2012.

LEE, J. et al. Economic feasibility of campus-wide photovoltaic systems in New England. **Renewable Energy**, v. 99, p. 452–464, 2016.

LEE, K. et al. Exploring Suitable Technology for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) Based on a Hidden Markov Model Using Patent Information and Value Chain Analysis. **Sustainability**, v. 9, n. 7, p. 1-19, 2017.

LIU, J.; LIN, X. Empirical analysis and strategy suggestions on the value-added capacity of photovoltaic industry value chain in China. **Energy**, v. 180, p. 356–366, 2019.

LIU, J.; XU, F.; LIN, S. Site selection of photovoltaic power plants in a value chain based on grey cumulative prospect theory for sustainability: A case study in Northwest China. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 386–397, 2017.

LIU, S.-Y.; PERNG, Y.-H.; HO, Y.-F. The effect of renewable energy application on Taiwan buildings: What are the challenges and strategies for solar energy exploitation? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 92–106, 2013.

LIVERA, A. et al. Recent advances in failure diagnosis techniques based on performance data analysis for grid-connected photovoltaic systems. **Renewable Energy**, v. 133, p. 126-143, 2019.

LO, C.-C.; WANG, C.-H.-; HUANG, C.-C.. The national innovation system in the Taiwanese photovoltaic industry: A multiple *stakeholder* perspective. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 80, n. 5, p. 893–906, 2013.

LUO, W. et al. A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 174, p. 157–162, 2018.

MADVAR, M. D. et al. Analysis of stakeholder roles and the challenges of solar energy utilization in Iran. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 13, n. 4, p. 438–451, 2018.

- MAH, D. N. et al. Barriers and policy enablers for solar photovoltaics (PV) in cities: Perspectives of potential adopters in Hong Kong. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 921-936, 2018.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 7, p. 4378–4390, 2011.
- MATEO, C. et al. Overcoming the barriers that hamper a large-scale integration of solar photovoltaic power generation in European distribution grids. **Solar Energy**, v. 153, p. 574–583, 2017.
- MAULEÓN, I. Assessing PV and wind roadmaps: Learning rates, risk, and social discounting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, p. 71–89, 2019.
- MECKLING, J.; HUGHES, L. Globalizing solar: Global supply chains and trade preferences. **International Studies Quarterly**, v. 61, n. 2, p. 225–235, 2017.
- MELLIT, A.; TINA, G. M.; KALOGIROU, S. A. Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 1-17, 2018.
- MOHER, D. et al. Reprint—Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **Physical Therapy**, v. 89, n. 9, p. 873–880, 2009.
- MONTGOMERY, S. Of towers, walls, and fields: perspectives on language in science. **Science**, v. 303, n. 5662, p. 1333–5, 2004.
- MOSER, D. et al. Identification of technical risks in the photovoltaic value chain and quantification of the economic impact. **Progress in Photovoltaics**, v. 25, n. 7, p. 592–604, 2017.
- MUNIYOOR, K. Is there a trade-off between energy consumption and employment: Evidence from India. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120262, 2020.
- NAHM, J.; STEINFELD, E. S. Scale-up Nation: China's Specialization in Innovative Manufacturing. **World Development**, v. 54, p. 288–300, 2014.
- NASCIMENTO, F. M. et al. Factors for measuring photovoltaic adoption from the perspective of operators. **Sustainability**, v. 12, n. 8, p. 3184, 2020.
- NĂSTASE, Gabriel et al. Photovoltaic development in Romania. Reviewing what has been done. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 523–535, 2018.
- NOLDEN, C.; BARNES, J.; NICHOLLS, J. Community energy business model evolution: A review of solar photovoltaic developments in England. **Renewable and Sustainable Energy**

**Reviews**, v. 122, p. 109722, 2020.

NOVIKAU, A. Conceptualizing and achieving energy security: The case of Belarus. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, p. 100408, 2019.

NYGAARD, I. et al. Measures for diffusion of solar PV in selected African countries. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 36, n. 7, p. 707–721, 2017.

OLIVA, S. H.; MACGILL, I.; PASSEY, R. Assessing the short-term revenue impacts of residential PV systems on electricity customers, retailers and network service providers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1494–1505, 2016.

OLSON, E. L. Green Innovation Value Chain analysis of PV solar power. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 73–80, 2014.

OSSEWEIJER, F. J. W. et al. A comparative review of building integrated photovoltaics ecosystems in selected European countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 1027–1040, 2018.

PADMANATHAN, K. et al. Integrating solar photovoltaic energy conversion systems into industrial and commercial electrical energy utilization — A survey. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 10, p. 39–54, 2018.

PANG, Y.; HE, Y.; CAI, H. Business model of distributed photovoltaic energy integrating investment and consulting services in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 943–965, 2019.

PEREZ-PEREZ, M. et al. A critical review of manufacturing and supply chain research through co-words analysis: 2004–2014. **2015 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS)**, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7369624/>>. Acesso em: 8 jul. 2019.

PHAM, D. D. T.; PAILLÉ, P.; HALILEM, N. Systematic review on environmental innovativeness: A knowledge-based resource view. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 1088–1099, 2019.

PITT, D.; MICHAUD, G.; DUGGAN, A. Analyzing the costs and benefits of distributed solar energy in Virginia (USA): a case study of collaborative energy planning. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 61, n. 11, p. 2032–2049, 2018.

PUSHPAKARAN, B. N. et al. Impact of silicon carbide semiconductor technology in Photovoltaic Energy System. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 971–989, 2016.

- QUANSAH, D. A.; ADARAMOLA, M. S. Ageing and degradation in solar photovoltaic modules installed in northern Ghana. **Solar Energy**, v. 173, p. 834–847, 2018.
- QUITZOW, R.; HUENTELER, J.; ASMUSSEN, H. Development trajectories in China's wind and solar energy industries: How technology-related differences shape the dynamics of industry localization and catching up. **Journal of Cleaner Production**, v. 158, p. 122–133, 2017.
- REDISKE, G. et al. Determinant factors in site selection for photovoltaic projects: A systematic review. **International Journal of Energy Research**, v. 43, n. 5, p. 1689–1701, 2019.
- RIGO, P. D. et al. Is the success of small-scale photovoltaic solar energy generation achievable in Brazil? **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118243, 2019.
- ROSA, C. B. et al. Development of a computational tool for measuring organizational competitiveness in the photovoltaic power plants. **Energies**, v. 11, n. 4, 2018.
- ROSA, C. B.; SILUK, J. C. M.; MICHELS, L. Proposal of the Instrument for Measuring Innovation in the Generation Photovoltaics. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 11, p. 4534–4539, 2016.
- RÜTHER, R.; ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1027–1030, 2011.
- SAMPAIO, P. G. V; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590–601, 2017.
- SAWHNEY, R. et al. Empirical analysis of the solar incentive policy for Tennessee solar value chain. **Applied Energy**, v. 131, p. 368–376, 2014.
- SCOPUS. **Scopus Content Coverage Guide**. 2020. Disponível em: <[https://www.elsevier.com/\\_data/assets/pdf\\_file/0007/69451/Scopus\\_ContentCoverage\\_Guide\\_WEB.pdf](https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0007/69451/Scopus_ContentCoverage_Guide_WEB.pdf)>. Acesso em: 09 mai. 2020.
- SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. Brasil, 2018. Disponível em: <<https://m.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/estudo%20energia%20fotovolt%C3%A1lica%20-%20baixa.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2020.
- SHAN, H.; YANG, J. Sustainability of photovoltaic poverty alleviation in China: An evolutionary game between *stakeholders*. **Energy**, v. 181, p. 264–280, 2019.
- SHARMA, V.; CHANDEL, S. S. Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 753-767, 2013.

- SHUAI, J. et al. Are China's solar PV products competitive in the context of the Belt and Road Initiative? **Energy Policy**, v. 120, p. 559–568, 2018.
- SHUBBAK, M. H. The technological system of production and innovation: The case of photovoltaic technology in China. **Research Policy**, v. 48, n. 4, SI, p. 993–1015, 2019.
- SHUM, K. L.; WATANABE, C. An innovation management approach for renewable energy deployment-the case of solar photovoltaic (PV) technology. **Energy Policy**, v. 37, n. 9, p. 3535–3544, 2009.
- SIM, J. The economic and environmental values of the R&D investment in a renewable energy sector in South Korea. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, p. 297–306, 2018.
- SINKE, W. C. Development of photovoltaic technologies for global impact. **Renewable Energy**, v. 138, p. 911–914, 2019.
- SMITH, B. L.; MARGOLIS, R. **Expanding the Photovoltaic Supply Chain in the United States: Opportunities and Challenges**. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2019. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73363.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- SU, Y.-S. Competing in the Global Solar Photovoltaic Industry: The Case of Taiwan. **International Journal of Photoenergy**, p. 1-11, 2013.
- SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Photovoltaic power stations in Germany and the United States: A comparative study by data envelopment analysis. **Energy Economics**, v. 42, p. 271–288, 2014.
- SUGANDHAVANIJA, P. et al. Determination of effective university-industry joint research for photovoltaic technology transfer (UIJRPTT) in Thailand. **Renewable Energy**, v. 36, n. 2, p. 600–607, 2011.
- SUN, H. et al. China's solar photovoltaic industry development: The status quo, problems and approaches. **Applied Energy**, v. 118, p. 221–230, 2014.
- SZABÓ, S.; JÄGER-WALDAU, A.; SZABÓ, L. Risk adjusted financial costs of photovoltaics. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, p. 3807–3819, 2010.
- TANAKA, K. et al. Global value chain assessment based on retrospectively induced economic costs associated with technology application: A case study of photovoltaic power system in Japan. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 460–472, 2018.
- TSOUTSOS, T. et al. Training and certification of PV installers in Europe A transnational need for PV industry's competitive growth. **Energy Policy**, v. 55, p. 593–601, 2013.
- VIEIRA, L. C.; AMARAL, F. G. Barriers and strategies applying Cleaner Production: a

- systematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 5–16, 2016.
- VOTTELER, R.; HOUGH, J.; VENTER, C. An analysis of the solar service provider industry in the Western Cape, South Africa. **Journal of Energy In Southern Africa**, v. 25, n. 2, p. 70–80, 2014.
- WALTERS, J.; KAMINSKY, J.; GOTTSCHAMER, L. A Systems Analysis of Factors Influencing Household Solar PV Adoption in Santiago, Chile. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 1257, 2018.
- WANG, H. et al. Analysis of the policy effects of *downstream* Feed-In Tariff on China's solar photovoltaic industry. **Energy Policy**, v. 95, p. 479–488, 2016.
- WEB OF KNOWLEDGE. **Web of Science - Publishers**. 2020. Disponível em: <<http://wokinfo.com/mbl/publishers/>>. Acesso em: 09 mai. 2020.
- WIJERATNE, W. M. P. U. et al. Design and development of distributed solar PV systems: Do the current tools work? **Sustainable Cities and Society**, v. 45, p. 553–578, 2019.
- WU, Y.; ZHOU, J. Risk assessment of urban rooftop distributed PV in energy performance contracting (EPC) projects: An extended HFLTS-DEMATEL fuzzy synthetic evaluation analysis. **Sustainable Cities and Society**, v. 47, p. 101524, 2019.
- YANG, R. J.; ZOU, P. X. W. Building integrated photovoltaics (BIPV): costs, benefits, risks, barriers and improvement strategy. **International Journal of Construction Management**, v. 16, n. 1, p. 39–53, 2016.
- YU, H. J. J. A prospective economic assessment of residential PV self-consumption with batteries and its systemic effects: The French case in 2030. **Energy Policy**, v. 113, p. 673–687, 2018.
- YU, Z. China's photovoltaic industry policy performance from the perspective of global value chain. **Energy Sources Part A - Recovery Utilization and Environmental Effects**, v. 40, n. 14, p. 1737–1742, 2018.
- ZHANG, F.; GALLAGHER, K. S. Innovation and technology transfer through global value chains: Evidence from China's PV industry. **Energy Policy**, v. 94, p. 191–203, 2016.
- ZHANG, X.; SHEN, L.; CHAN, S. Y. The diffusion of solar energy use in HK: What are the barriers? **Energy Policy**, v. 41, p. 241–249, 2012.
- ZHAO, Z.; ZHANG, S.; ZUO, J. A critical analysis of the photovoltaic power industry in China - From diamond model to gear model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4963–4971, 2011.

ZOU, H. et al. Market dynamics, innovation, and transition in China's solar photovoltaic (PV) industry: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 197–206, 2017.

ZYOUNG, S. H.; FUCHS-HANUSCH, D. A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques. **Expert Systems with Applications**, v. 78, p. 158–181, 2017.

#### 4 ARTIGO 3 – Competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil

Taís Bisognin Garlet

José Luis Duarte Ribeiro

Fernando de Souza Savian

Julio Cezar Mairesse Siluk

**Resumo:** Este artigo apresenta um diagnóstico da competitividade da cadeia de valor brasileira da geração distribuída de energia fotovoltaica (FV). Ainda, são discutidas dificuldades e estratégias identificadas para superá-las e fortalecer o mercado. Para isso, foram realizadas análise da literatura e entrevistas com 87 profissionais de todos os elos da cadeia de valor. Os resultados apontam que a competitividade da indústria FV brasileira é afetada principalmente por lacunas na produção de módulos FV, compreendendo a fabricação de lingotes e *wafers* de silício grau solar, célula FV, caixa de junção, *backsheet*, filme encapsulante e vidro especial fotovoltaico. Esse cenário se deve ao aumento dos custos de produção no país, à carga tributária elevada e à falta de fiscalização e incentivos para o desenvolvimento da cadeia produtiva. Os resultados também revelam a necessidade de estabelecer arranjos colaborativos internacionais para garantir agilidade em processos inovadores e possibilitar que o país obtenha ganhos de competitividade industrial. Além disso, o Brasil deve intensificar as conexões entre os elos das cadeias de valor principal e auxiliar para acelerar o desenvolvimento do setor fotovoltaico. O diagnóstico abrangente apresentado neste estudo é particularmente útil para que acadêmicos, formuladores de políticas, reguladores e profissionais envolvidos na cadeia de valor FV desenvolvam pesquisas e ações para aumentar a competitividade do setor e a participação da geração FV distribuída na matriz elétrica nacional.

**Palavras-chave:** Energia Fotovoltaica; Geração Distribuída; Competitividade; Cadeia de Valor; Política Energética; Indústria Fotovoltaica; Energia Renovável.

#### **Abreviações:**

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CREA: Conselho Regional de Engenharia e Agronomia

FV: Fotovoltaico

ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

II: Imposto de Importação

LCD: Display de Cristal Líquido

MW: Megawatt

P&D: Pesquisa e Desenvolvimento

WEEE: Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Com a carência no fornecimento global de eletricidade e a poluição ambiental cada vez mais proeminentes, a geração fotovoltaica (FV) tem se destacado frente às fontes energéticas renováveis existentes devido à sua tecnologia limpa, segura e eficiente (REN et al., 2020; SHUBBAK, 2019). Essa fonte permite a utilização do recurso solar, reduzindo o consumo de eletricidade proveniente de fontes tradicionais e melhorando a infraestrutura energética e a capacidade de desenvolvimento sustentável (MING et al., 2015). Nesse contexto, as gerações fotovoltaicas centralizada e distribuída vêm se desenvolvendo rapidamente à medida que a energia limpa é promovida. Ressalta-se ainda que a geração FV distribuída apresenta maior retorno sobre o investimento e menor risco e consiste no direcionamento futuro das tecnologias solares (LI et al., 2020).

A geração distribuída de energia fotovoltaica consiste em pequenas unidades geradoras que são instaladas principalmente próximo aos centros de carga e em pontos estratégicos do sistema de distribuição de energia elétrica (DAUD et al., 2016). Esta modalidade de geração é adequada nos ambientes urbanos e tem se tornado progressivamente mais competitiva, propiciando benefícios econômicos para os consumidores que a utilizam e reduzindo as emissões de carbono (CHUNG, 2018; HEIDEIER et al., 2020). No Brasil, o desenvolvimento de sistemas FV conectados à rede tem sido crescente desde 2012, tendo em vista a publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012), a necessidade de diversificação da matriz elétrica e o bom índice de radiação solar no país (DE FARIA JR.; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017). Esse crescimento também pode estar associado à curva de difusão de inovações, em que investidores confiam na concepção do

mercado fotovoltaico e, após observarem resultados positivos sobre o investimento, incentivam outros usuários a adotarem a tecnologia, tornando-a mais presente no cenário energético (GARLET et al., 2019).

O desenvolvimento do setor no Brasil pode ser observado na comparação entre as capacidades instaladas de geração FV distribuída de 2018 e 2021, que foram de 562 MW e 7,23 GW, respectivamente. Além disso, este tipo de geração representa 97,4% de todas as fontes de geração distribuída (ANEEL, 2021). No entanto, apesar de os consumidores brasileiros demonstrarem interesse crescente em sistemas fotovoltaicos, é possível notar que ainda não existe uma adoção massiva dessa tecnologia quando comparado ao potencial de geração existente no país. Atualmente, a geração FV distribuída corresponde a 3,99% de toda energia elétrica gerada no país (ANEEL, 2021; EPE, 2021). Isso aponta para os desafios que as empresas do setor, governo e instituições de pesquisa enfrentam para obter informações e compreender as fontes de vantagem competitiva da tecnologia FV (OLIVEIRA NETO et al., 2017).

A dificuldade na compreensão dos fatores que influenciam a competitividade da geração distribuída de energia fotovoltaica ocorre devido à complexidade de alternativas renováveis inovadoras obterem sucesso tecnológico e aceitação do público (CHOUDHARY; SRIVASTAVA, 2019). Além de inovação tecnológica, o mercado FV requer características favoráveis em uma diversidade de esferas para ampliar o número de clientes adotantes da tecnologia, trazendo ganhos à competitividade do setor (RIGO et al., 2019). Ainda, devem ser observadas as interações entre os diferentes atores nos segmentos *upstream*, *midstream*, *downstream* e auxiliar da cadeia de valor fotovoltaica a fim de compreender a transferência de conhecimento e as relações políticas, econômicas e gerenciais que permitem a expansão desse mercado (JUNTUNEN; HYYSAALO, 2015).

No segmento *upstream*, são observados os maiores lucros da cadeia de valor, uma vez que a especificidade e o nível tecnológico são elevados e levam a um mercado de baixa concorrência, oligopolista e dominado por grandes empresas (LEE et al., 2017; LIU; LIN, 2019). Já as empresas *midstream* utilizam os recursos com eficiência e oferecem produtos e serviços de baixo valor agregado, o que acarreta menores lucros e um mercado próximo à concorrência ideal (LIU; LIN, 2019; SU, 2013). O segmento *downstream*, por sua vez, apresenta baixas barreiras de entrada, com a obtenção de lucros por montagem, venda e manutenção de produtos e prestação de serviços, proporcionando um ambiente de negócios

perfeitamente competitivo (SU, 2013). Na cadeia auxiliar, são identificadas as atividades e instituições acadêmicas, financeiras, governamentais e concessionárias de distribuição que fornecem suporte para o funcionamento adequado da cadeia de valor principal, possibilitando que o setor FV obtenha ganhos de escala e de competitividade.

Tendo em vista os distintos cenários de concorrência observados ao longo da cadeia de valor, é fundamental o entendimento dos fatores que se aplicam a cada um dos elos envolvidos para que disponham de informações precisas e direcionem seus planos estratégicos ao aumento da competitividade e expansão do mercado fotovoltaico. Nesse contexto, Garlet et al. (2020) identificam os principais atores e atividades que compõem a cadeia de valor da geração FV distribuída, bem como os fatores que influenciam a sua competitividade. Em seu estudo, Liu e Lin (2019) exploram a estrutura da cadeia de valor da indústria FV chinesa e analisam os fatores que limitam sua capacidade geral de valor agregado. Já Zhang e Gallagher (2016) decompõem a cadeia de valor FV global e determinam os principais atores que moldam a transferência e difusão da tecnologia na China. Zhao, Zhang e Zuo (2011) analisam fatores com impactos significativos no desenvolvimento da competitividade da indústria FV chinesa, enquanto Shuai et al. (2018) investigam a competitividade internacional dos produtos FV chineses. No Brasil, Rosa et al. (2020) propõem uma modelagem matemática para mensurar o nível de competitividade dos municípios para instalação de sistemas fotovoltaicos.

As principais pesquisas relacionadas à competitividade e à cadeia de valor FV são concentradas na China, tendo em vista sua vanguarda e maturidade industrial no setor. Sendo assim, identifica-se a necessidade de avançar os estudos para as realidades brasileira e de países com contextos socioeconômicos similares. Logo, podem ser analisados os aspectos que devem ser mais bem gerenciados pelos distintos *stakeholders*, incentivando a expansão desse tipo de geração de energia renovável. Desse modo, este capítulo apresenta um diagnóstico da competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil. O estudo utiliza um método qualitativo, baseado em análises da literatura e documental e entrevistas com 87 profissionais de todos os elos da cadeia de valor brasileira, para apontar como os *stakeholders* estão competitivamente posicionados frente ao mercado. A pesquisa contribui para identificar as principais forças e fraquezas dos diversos elos, fornecendo direcionamentos para que ampliem suas capacidades competitivas no mercado e se fortaleçam diante dos desafios impostos nas esferas econômica, técnica, gerencial, política e mercadológica.

Este capítulo está estruturado em cinco subcapítulos. No subcapítulo dois, é analisada a cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica, discutindo os elos presentes no Brasil. O subcapítulo três descreve o método de pesquisa, explicitando as etapas necessárias para a condução do estudo. No subcapítulo quatro, são apresentados os resultados e suas discussões com base nas informações obtidas através das entrevistas e da literatura. Finalmente, o subcapítulo cinco expõe as conclusões, enfatizando as implicações do estudo, além de sugestões para pesquisas futuras.

#### 4.2 CADEIA DE VALOR DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

A cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica consiste em uma estrutura funcional que conecta diversos elos ao longo dos setores *upstream*, *midstream*, *downstream* e auxiliar (GARLET et al., 2020; LIU et al., 2020). Esses elos podem influenciar a dinâmica do ciclo de vida das empresas e instituições em outros segmentos por meio de inovações e combinações distintas de atores envolvidos na cadeia de valor (HIPPI; BINZ, 2020). Como exemplo desse processo dinâmico, Kapoor e Furr (2015) destacam a entrada e atuação de empresas do setor fotovoltaico em diferentes partes da estrutura de valor com o objetivo de sustentarem sua vantagem competitiva e garantirem sua sobrevivência no mercado. Nesse sentido, o capítulo anterior identificou os elos da cadeia de valor global da geração distribuída de energia fotovoltaica e as relações e aspectos que levam ao aumento da competitividade do setor. A cadeia de valor construída é fundamental para o desenvolvimento desta etapa da tese e constitui um ponto de partida para identificação dos elos presentes no cenário brasileiro e diagnóstico da competitividade do mercado FV do país.

Como foi observado no capítulo 3, o segmento *upstream* engloba, além das etapas necessárias à produção da célula fotovoltaica, a fabricação das matérias-primas da parte estrutural do módulo e dos componentes necessários ao balanceamento do sistema fotovoltaico. Esse segmento compreende empresas com elevado nível tecnológico, alta padronização, automação especializada e que exigem investimentos significativos nas instalações (HIPPI; BINZ, 2020; LEE et al., 2017). Empresas americanas, japonesas e europeias foram pioneiras no mercado FV e, após a globalização decorrente de transferência de tecnologia, a China emergiu na produção de polissilício. O desenvolvimento da indústria fotovoltaica chinesa está diretamente associado ao fornecimento de subsídios massivos e capital de baixo custo a

empresas do setor (HALEY; SCHULER, 2011). Esses incentivos tornaram o país um dos principais líderes no segmento de fabricação *upstream*, juntamente com outros países asiáticos (ZHANG; GALLAGHER, 2016). O cenário *upstream* brasileiro, contudo, ainda não alcançou maturidade tecnológica e recursos necessários para competir frente à indústria asiática. Apesar de o Brasil dispor de extensas reservas de silício e contar com empresas de extração de sílica e produção de silício metálico, ainda não existem produtores de silício purificado até o grau solar no país (SEBRAE, 2018).

O segmento *midstream*, por sua vez, corresponde à parte central da cadeia de valor e abrange a fabricação da célula FV, do módulo e seus componentes e dos equipamentos do balanceamento do sistema. De maneira semelhante ao observado no segmento *upstream*, as empresas *midstream* se desenvolveram inicialmente na Europa, Estados Unidos e Japão (MATHEWS; HU; WU, 2011). Entretanto, através de mecanismos de difusão de tecnologia e do desenvolvimento dinâmico do setor FV, foi identificada uma mudança significativa das atividades produtivas em direção a economias como China e Taiwan, que em 2016 produziram mais de 70% do montante global de módulos cristalinos (BINZ; TANG; HUENTELER, 2017; QUITZOW, 2015). Por outro lado, com relação à produção de componentes para balanceamento do sistema FV, os países europeus são mais experientes, visto que se tornaram importantes consumidores de produtos fotovoltaicos (BINZ; TANG; HUENTELER, 2017). Sendo assim, os principais produtores do segmento *midstream* estão presentes na Alemanha, China, Taiwan e América do Norte (SU, 2013). No Brasil, o mercado *midstream* fotovoltaico ainda está em desenvolvimento, possuindo representação discreta nos elos produtivos de módulos, cabos, moldura, silicone de vedação e componentes para balanceamento do sistema FV (SEBRAE, 2018). Cenários ainda não explorados pelo país são a fabricação de caixas de junção, *backsheets*, filme encapsulante, vidro grau fotovoltaico e células fotovoltaicas de silício, uma vez que envolvem alto custo de investimento para instalação de fábricas.

O segmento *downstream* envolve as atividades mais diretamente ligadas ao usuário final, como a integração do sistema fotovoltaico, sua operação e manutenção e posterior desativação. No Brasil, a presença de todos esses elos pode ser observada (SEBRAE, 2018). Nesse setor, é observado alto valor agregado, porém com número crescente de empresas atuantes, levando a uma concorrência acentuada (LIU; LIN, 2019). Meckling e Hughes (2017) destacam que o segmento *downstream* possui empresas que são, em sua maioria, verticalmente especializadas, desenvolvendo projetos FV e realizando a instalação, operação e manutenção

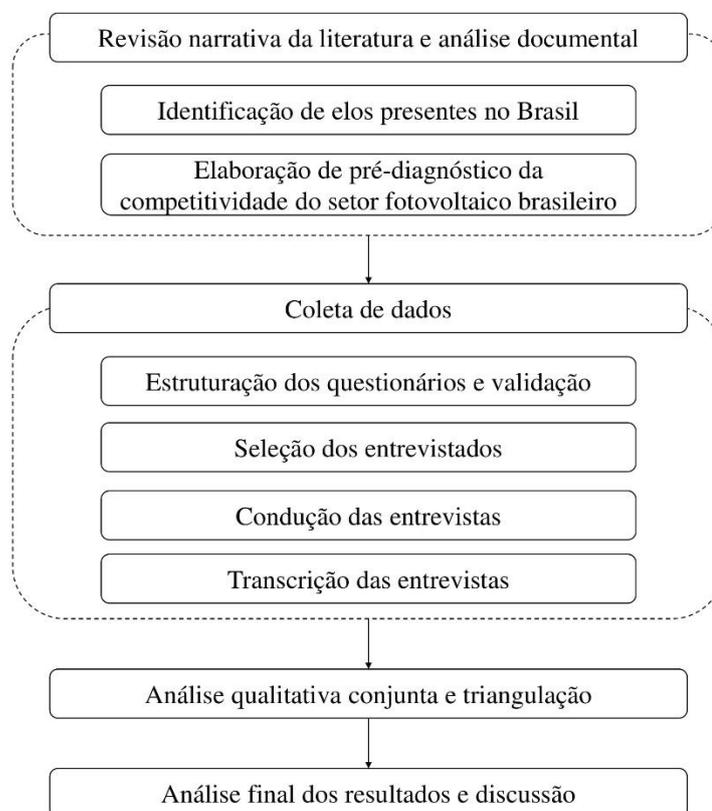
dos sistemas. Países como Japão, Alemanha, Itália, Estados Unidos e China se destacam com relação às atividades dessa parte da cadeia de valor, visto que concentram as maiores capacidades instaladas de geração distribuída de energia fotovoltaica (ZHANG; GALLAGHER, 2016). Empresas que realizam desativação e reciclagem do sistema FV, entretanto, têm presença discreta na maioria dos países, uma vez que há deficiência de infraestrutura de coleta de resíduos e de políticas de incentivo eficazes (GUO; KLUSE, 2020).

A cadeia auxiliar envolve todas as atividades e serviços que apoiam a cadeia de valor principal, possibilitando a interação de empresas, governo, instituições e consumidores com a finalidade de trocar conhecimentos técnicos e informações de mercado (KLITKOU; COENEN, 2013; VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014; ZHANG; GALLAGHER, 2016). Com a difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica, diversas instituições e empresas ampliaram sua gama de soluções e áreas de atuação a fim de explorarem o mercado de energias renováveis, que representa uma oportunidade de negócio com potencial de crescimento significativo. Dessa forma, a presença de todos os elos da cadeia auxiliar pode ser observada no Brasil (SEBRAE, 2018), fornecendo suporte para que as atividades da estrutura principal sejam desenvolvidas e propiciando o crescimento e o aumento da competitividade do setor fotovoltaico.

#### 4.3 MÉTODO

Esta etapa da tese baseou-se em uma abordagem qualitativa, apresentando naturezas exploratória e descritiva, e foi estruturada metodologicamente em três etapas, conforme representado na Figura 9. O estudo amplia o conhecimento sobre a cadeia de valor da geração distribuída fotovoltaica no Brasil e apresenta aspectos qualitativos que direcionam os elos a diferentes níveis de competitividade. Além disso, permite a identificação de lacunas e sugere estratégias para desenvolvimento do setor. Este tipo de pesquisa tem sido utilizado no cenário energético, especialmente com fontes de energia renováveis, a fim de compreender as perspectivas dos diferentes atores envolvidos na indústria energética e identificar as características e oportunidades para superar potenciais desafios e desenvolver o mercado de energia limpa (CURTIUS, 2018; CÉSAR et al., 2019; DO NASCIMENTO et al., 2020).

Figura 9 – Estrutura metodológica da pesquisa



Este estudo foi baseado na observação de dados secundários, coletados na revisão narrativa da literatura e análise documental, e de dados primários, obtidos por meio de entrevistas estruturadas com profissionais envolvidos em todos os elos da cadeia de valor fotovoltaica brasileira. Como sugerido por César et al. (2019), foi conduzida uma revisão cíclica entre os dados secundários e a pesquisa de campo para obtenção de resultados atualizados e condizentes com a realidade brasileira. As subseções seguintes apresentam em detalhes as etapas metodológicas utilizadas para desenvolvimento desta etapa da tese.

#### 4.3.1 Revisão narrativa da literatura e análise documental

A partir da definição dos objetivos desta etapa da pesquisa, uma revisão narrativa foi conduzida para obter informações que apoiem o diagnóstico da posição competitiva de cada elo da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica presente no Brasil. Esse tipo de revisão representa uma síntese narrativa abrangente de informações publicadas

anteriormente, e é útil para apresentar uma perspectiva ampla sobre o tema (GREEN; JOHNSON; ADAMS, 2006). Para isso, foram pesquisadas as combinações das palavras-chave “*photovoltaic energy*”, “*solar home system*”, “*value chain*”, “*stakeholder*” e “*competitiveness*” nas bases de dados Scopus e Web of Science, durante o período de 2010 a 2021.

Além da pesquisa realizada nas bases de dados acadêmicas, foi conduzida uma análise de documentos, notas técnicas, regulações e relatórios publicados por instituições que desenvolvem estudos acerca do mercado de energia fotovoltaica. Metodologicamente, a análise documental apresenta vantagens significativas, tendo em vista que se trata de um método que elimina em parte a eventualidade da influência do conjunto de informações pesquisadas. Sendo assim, foram buscados e localizados documentos pertinentes à temática, analisando-se previamente sua credibilidade e representatividade (CELLARD, 2008). Ressalta-se que a revisão da literatura e a análise documental contribuíram para a identificação dos componentes da cadeia de valor FV presentes no Brasil. Ainda, a análise dos materiais selecionados contribuiu para a elaboração de um pré-diagnóstico da competitividade do setor fotovoltaico brasileiro, resultando em uma discussão preliminar sobre pontos fortes, desafios e estratégias recomendadas para os elos da cadeia de valor com base na perspectiva teórica.

#### **4.3.2 Coleta de dados**

Para coleta de dados primários, foram desenvolvidos dois roteiros de entrevistas, apresentados nos Apêndices A.1 e A.2. Os instrumentos são compostos por questões fechadas e abertas que garantem a cobertura dos principais eixos da pesquisa. Como apresentado na Tabela 8, os questionários passaram por um processo de validação interna por especialistas com diferentes perfis e trajetórias para averiguar a linguagem aplicada e avaliar se os conteúdos das questões estavam alinhados com os objetivos da pesquisa (HOSS; CATEN, 2010). Um questionário foi aplicado a profissionais de todos os elos da cadeia de valor principal da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil a fim de que apontassem como estão competitivamente posicionados perante o cenário global. Já o outro instrumento de coleta foi destinado a profissionais dos elos da cadeia de valor auxiliar para compreender como podem contribuir para elevar a competitividade da indústria FV brasileira. Assim, utilizando uma abordagem qualitativa, foram conduzidas entrevistas estruturadas de forma virtual, através de

videochamadas ou preenchimento de formulários na ferramenta Google Forms®, de acordo com a preferência e disponibilidade dos respondentes.

Tabela 8 – Perfis dos validadores

|                    | <b>Perfil</b>   |
|--------------------|---|
| <b>Validador 1</b> | Engenheiro Eletricista e Doutorando em Engenharia de Produção. Desenvolveu pesquisas relacionadas à gestão de riscos organizacionais e há 4 anos conduz estudos relacionados a processos de gestão em energia.                |
| <b>Validador 2</b> | Doutor em Engenharia e professor universitário há 32 anos. Foi Secretário de Desenvolvimento Tecnológico e trabalha diretamente no desenvolvimento de pesquisas voltadas à gestão de inovação, tecnologia e sustentabilidade. |
| <b>Validador 3</b> | Doutor em Engenharia de Produção e professor universitário há 20 anos. Tem experiência em consultorias empresariais e atua principalmente nas áreas de gestão estratégica, inovação, competitividade e gestão de energia.     |

Os entrevistados foram selecionados por conveniência, mas respeitando alguns critérios. Inicialmente, foram mapeadas as empresas e instituições nacionais presentes em cada um dos elos da cadeia. Na sequência, foram escolhidas pessoas dentro dessas organizações que ocupavam cargos de liderança e que tivessem experiência na área. Ainda, foi adotada a estratégia de amostragem bola de neve, em que o conhecimento de alguns entrevistados-chave foi utilizado para identificar outros potenciais respondentes a fim de garantir um maior número de entrevistas. A amostra englobou 87 profissionais com diferentes perfis relacionados às áreas de tecnologia, política, pesquisa e mercado envolvidos em empresas e organizações de origem brasileira que fazem parte da cadeia de valor da geração FV distribuída. Ressalta-se que os entrevistados podem enquadrar-se em mais de um elo da cadeia de valor, tendo em vista a abrangência de atuação da empresa na qual trabalham. A Tabela 9 mostra a caracterização da amostra de acordo com blocos de elos da cadeia de valor. A amostra inclui indivíduos experientes e atuantes em instituições de renome e impacto estratégico no Brasil. Além disso, permite conclusões significativas para o estudo, uma vez que pesquisas realizadas com participantes com características específicas para o objetivo do trabalho oferecem poder de informação suficiente (DO NASCIMENTO et al., 2020; MALTERUD; SIERSMA; GUASSORA, 2016).

Tabela 9 - Caracterização da amostra

| <b>Bloco de elos</b>                                      | <b>Caracterização da amostra</b>  |
|---|---|
| Célula fotovoltaica                                       | 3 respostas de profissionais de empresas brasileiras de extração de sílica e produção de silício grau metálico, com experiência média de 16 anos no mercado.  |
| Produção da parte estrutural do módulo                    | 28 respostas de profissionais de empresas brasileiras atuantes nos 10 elos do bloco, com experiência média de 11 anos no mercado.   |
| Produção do módulo fotovoltaico                           | 3 respostas de profissionais de empresas brasileiras atuantes na produção de módulo fotovoltaico, com experiência média de 6 anos no mercado.   |
| Balanceamento do sistema fotovoltaico                     | 82 respostas de profissionais de empresas brasileiras atuantes nos 29 elos do bloco, com experiência média de 9 anos no mercado.  |
| Integração, operação e manutenção do sistema fotovoltaico | 23 respostas de profissionais de empresas brasileiras atuantes nos 3 elos do bloco, com experiência média de 7 anos no mercado.   |
| Desativação do sistema fotovoltaico                       | 7 respostas de profissionais de empresas brasileiras atuantes nos 3 elos do bloco, com experiência média de 6 anos no mercado.  |
| Cadeia auxiliar   | 19 respostas de profissionais atuantes em empresas, órgão regulador, governo, concessionárias, instituições de P&D, instituições financeiras, organizações do setor fotovoltaico e escritórios de assistência jurídica, com experiência média de 9 anos no setor. |

As entrevistas foram realizadas no período de setembro de 2020 a maio de 2021, e as informações adquiridas por videochamadas foram transcritas para um documento, em que foram armazenadas com as respostas obtidas através do preenchimento dos formulários.

#### **4.3.3 Análise dos resultados**

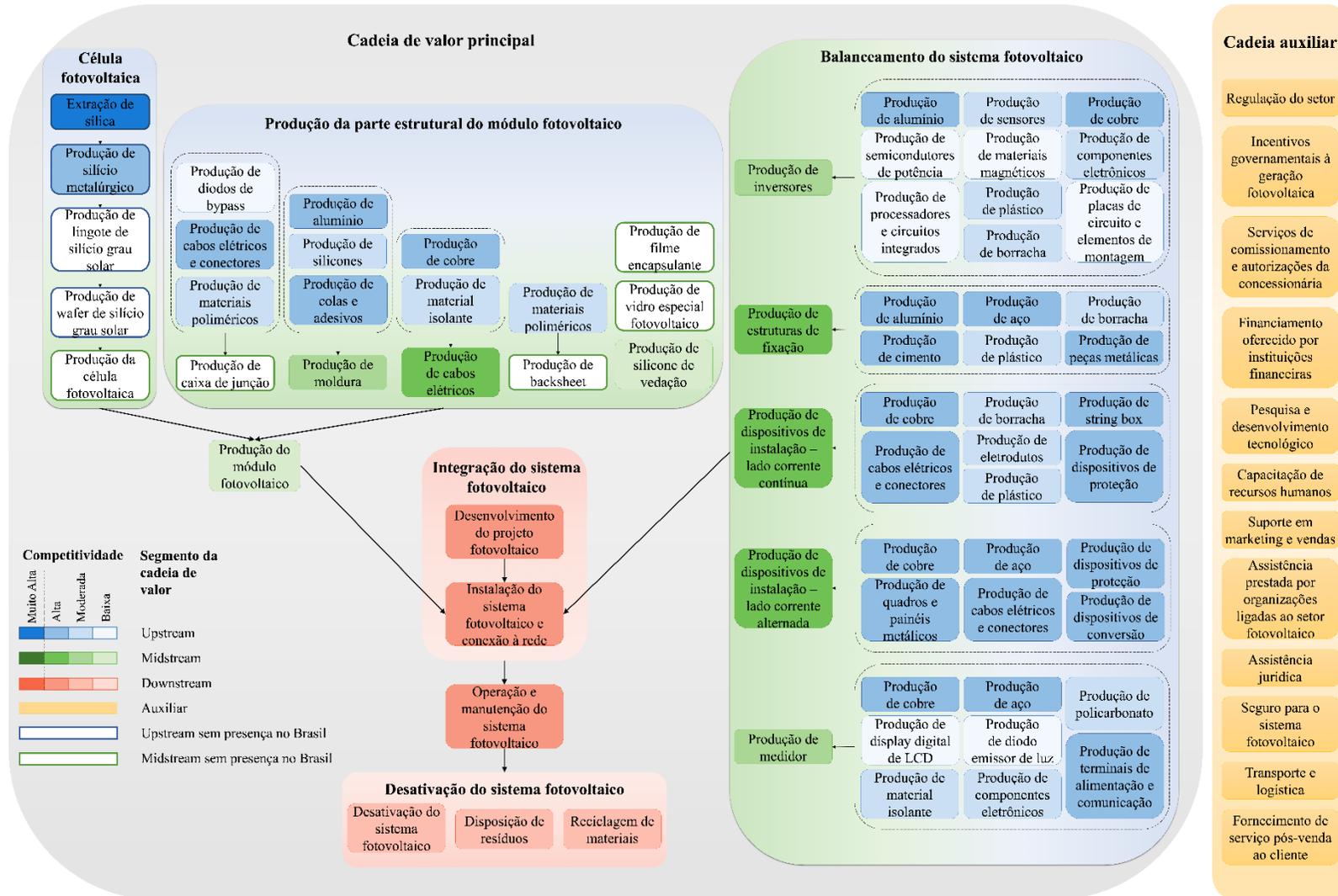
Os entrevistados da cadeia de valor principal atribuíram um nível de competitividade ao seu elo em uma escala qualitativa, composta pelas opções: inexistente, baixa, moderada, alta ou muito alta. O nível de confiança atribuído pelos profissionais foi alto ou muito alto, indicando que suas respostas são condizentes com a realidade. A partir das informações obtidas, foi feito um relatório para cada elo com base na análise qualitativa conjunta das respostas, respeitando as afirmações dos entrevistados quanto a similaridades e discrepâncias, quando aplicável. Na sequência, visou-se associar o pré-diagnóstico feito para cada elo com base na literatura, em que foram buscados aspectos econômicos, políticos, mercadológicos, sociais e gerenciais, com os relatos das entrevistas, unindo-os em um único documento. Assim, foi possível identificar o

nível de competitividade de cada elo perante o mercado global, resultando na Figura 10. Os resultados contribuíram ainda para a elaboração das Tabelas 10 a 15, que apontaram lacunas e direcionamentos para que os *stakeholders* obtenham ganhos de competitividade em relação ao mercado global e às demais fontes energéticas e consolidem a tecnologia fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.

#### 4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta e discute os resultados encontrados através das entrevistas com os profissionais envolvidos na cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica brasileira e das informações obtidas na literatura acadêmica e análise documental. Desse modo, a Figura 10 apresenta o diagnóstico da competitividade dos elos da cadeia de valor do país, cujos níveis variam de baixo a muito alto, uma vez que nenhum elo obteve competitividade inexistente. As subseções seguintes detalham e embasam os níveis de competitividade obtidos, de acordo com sete blocos de elos: célula fotovoltaica; produção da parte estrutural do módulo fotovoltaico; produção do módulo fotovoltaico; balanceamento do sistema fotovoltaico; integração, operação e manutenção do sistema fotovoltaico; desativação do sistema fotovoltaico; e cadeia auxiliar.

Figura 10 - Competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil



#### 4.4.1 Célula fotovoltaica

Este bloco engloba os elos necessários à produção da célula fotovoltaica de silício, que requer a extração da sílica, a produção de silício metalúrgico e a fabricação de lingotes e *wafers* de silício grau solar. De acordo com Ferreira et al. (2018) e Sampaio e González (2017), as células fotovoltaicas de silício dominam o mercado mundial de módulos comerciais, uma vez que apresentam maturidade tecnológica, robustez e confiabilidade, além de possuírem taxas de eficiência substancialmente maiores que as desempenhadas por módulos de filmes finos. No Brasil, não há fábricas ativas de células solares de silício (MOEHLECKE; ZANESCO, 2012); no entanto, destaca-se a participação competitiva do país na extração de sílica e produção de silício metalúrgico, enquadrados no segmento *upstream* da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica.

As empresas brasileiras são altamente competitivas na mineração de sílica, pois possuem grande experiência no fornecimento de areia industrial, se adaptam facilmente às mudanças no mercado e buscam o desenvolvimento de soluções que atendam às necessidades dos clientes. Além disso, grande parte das reservas de quartzo do Brasil são de origem hidrotermal e constituem as rochas que podem ser utilizadas em aplicações fotovoltaicas devido à quantidade reduzida de impurezas de outros minerais (LÜDKE, 2018). Os entrevistados complementam a informação ao destacarem que o país detém as maiores reservas mundiais de quartzo de alta qualidade, em que é encontrado o óxido de silício processado para obtenção do silício metalúrgico (SÉRGIO et al., 2014).

O Brasil figura como um dos líderes mundiais na produção de silício grau metalúrgico, juntamente com a China e os Estados Unidos (DE SOUZA; CAVALCANTE, 2016; ELGAMAL; DEMAJOROVIC, 2020; SÉRGIO et al., 2014). Desse modo, é possível afirmar que o país é competitivo no segmento, uma vez que possui empresas de grande porte com elevada eficiência operacional, domínio tecnológico e que utilizam insumos de produção de boa qualidade. Ademais, o Brasil representa um dos principais exportadores de silício para a Europa (BARTIE et al., 2021). No entanto, os entrevistados apontam que a falta de tecnologia de produção de silício grau solar e a existência de riscos regulatórios e ambientais limitam as empresas nacionais de obterem competitividade superior quando comparadas às estrangeiras. Assim, perde-se a oportunidade de o país exercer papel mais ativo e relevante no comércio internacional desse segmento, limitando-se à exportação de *commodities* (ELGAMAL;

DEMAJOROVIC, 2020). Como estratégia para contornar essas dificuldades, os respondentes salientam a importância de o país adquirir tecnologia economicamente viável para se inserir na fabricação de silício grau solar, que apresenta alto valor agregado. Procedimentos e algoritmos para prever cenários macroeconômicos com maior precisão também são elementos úteis para superar esses desafios. A Tabela 10 resume as lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para este bloco.

Tabela 10 - Lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para Célula fotovoltaica

| Lacunas de competitividade   | Estratégias recomendadas   |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lingote de silício grau solar</li> <li>• <i>Wafer</i> de silício grau solar</li> <li>• Célula fotovoltaica</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhoria na legislação para diminuir riscos regulatórios e ambientais</li> <li>• Investimentos em tecnologia para entrar na manufatura de silício grau solar, que tem maior valor agregado</li> <li>• Desenvolvimento de procedimentos e algoritmos para prever cenários macroeconômicos relacionados à energia com maior precisão</li> </ul> |

#### 4.4.2 Produção da parte estrutural do módulo fotovoltaico

Este bloco compreende elos dos segmentos *upstream* e *midstream* necessários à produção da parte estrutural do módulo fotovoltaico, englobando a manufatura de caixa de junção, moldura, cabos elétricos, *backsheets*, assim como a fabricação de suas matérias-primas e demais componentes imprescindíveis à montagem do módulo. No Brasil, esse bloco da cadeia de valor apresenta competitividade moderada, alavancada pela produção de *commodities* e limitada por dificuldades na fabricação de diodos de *bypass* e silicone de vedação.

Os maiores níveis de competitividade nesse bloco são observados nas empresas fabricantes de alumínio, colas e adesivos, cobre, cabos elétricos e conectores. O alumínio brasileiro apresenta qualidade similar ou superior aos demais fabricantes globais, sendo competitivo diante dos Estados Unidos e de países europeus. No entanto, no aspecto comercial, os entrevistados mencionam que o país se depara com uma forte concorrência em termos de custo proveniente de empresas de origem chinesa, que em 2020 foram responsáveis por 56% da produção mundial de alumínio primário (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2021a). Essas dificuldades que limitam o Brasil de competir mais fortemente no mercado internacional são decorrentes dos altos custos de produção, carga tributária elevada, falta de incentivos para o

desenvolvimento da cadeia produtiva e altos custos de energia elétrica (ASHKENAZI, 2019). Assim, os respondentes apontam que é imprescindível que o país conduza uma reforma tributária, proporcionando maior isonomia de impostos entre os produtos nacionais e importados, e estabeleça incentivos locais voltados para o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias. Melhores preços das matérias-primas e um setor de pesquisa e desenvolvimento estabelecido também são destacados pelas empresas nacionais de colas e adesivos como estratégias para elevar sua competitividade. Essas iniciativas são decorrentes de preocupações dos empresários do setor com a falta de estrutura e capital no país, bem como da elevada concorrência com grandes aglomerados de empresas internacionais no ramo de resinas adesivas.

Os volumes das reservas de minério de cobre que ocorrem no Brasil colocam o país em uma posição competitiva no mercado internacional, caracterizando uma *commodity* importante dentre os minérios exportados (SILVA et al., 2019). Além disso, os entrevistados salientam que o cobre é uma matéria-prima de alto valor e apresenta diversas aplicações na geração e transmissão de energia elétrica. Entretanto, o cobre é altamente dependente da variação do dólar e sua indústria nacional é diretamente impactada pela concorrência com os principais *players* mundiais, como Chile, Peru e China, uma vez que não há barreiras alfandegárias para equilibrar a concorrência (TABELIN et al., 2021). Adicionalmente, fios e cabos elétricos de baixa qualidade e performance são comercializados no mercado nacional devido à falta de fiscalização, não atendendo aos requisitos de norma e gerando uma concorrência desleal quanto aos custos de produção. Assim, os profissionais das empresas produtoras de cobre e cabos elétricos reivindicam a criação de uma regulação nacional que garanta a disponibilização de cobre com qualidade superior para venda no mercado, além de ajuste de taxaço dos produtos nacionais em relação aos importados e linhas de financiamento oficiais a juros internacionais para aumento de capacidade e melhoria tecnológica. Sob a perspectiva dos fabricantes de cabos elétricos e conectores, ressalta-se ainda a necessidade de incentivos para que se insiram mais fortemente no mercado de cabos para aplicações fotovoltaicas.

No nível de competitividade moderada, destacam-se as empresas brasileiras fabricantes de materiais poliméricos, moldura, silicões e material isolante. Esse resultado é decorrente da falta de materiais e insumos no mercado interno e, conseqüentemente, do seu custo elevado, uma vez que as matérias-primas são em sua grande maioria importadas e experimentam o alto preço do dólar em relação ao real. Ademais, os entrevistados pontuam o “Custo Brasil” como

limitante à competitividade, que se refere a dificuldades estruturais, burocráticas e econômicas que impactam negativamente o mercado nacional, resultando em carga tributária excessiva e encarecimento dos produtos e custos logísticos (FRAZÃO, 2021). Dessa forma, é necessário que o país reduza a burocracia e a carga tributária, atraia investimentos, proponha a abertura do mercado nacional e apoie a inovação para alavancar a produtividade e garantir a expansão da economia (FRANK et al., 2016). Ainda, os respondentes salientam a importância de o país ter acesso à matéria-prima de alta qualidade com preço competitivo para que seus elos da cadeia de valor fotovoltaica superem os entraves observados e se consolidem no mercado global.

Dentre os elos que limitam a competitividade do bloco de produção da parte estrutural do módulo, destacam-se os fabricantes nacionais de diodo de *bypass* e silicone de vedação. O baixo nível de competitividade está relacionado à produção em pequena escala desses materiais no país, uma vez que sua manufatura é majoritariamente concentrada na China. Além disso, o custo de silicões no Brasil é muito alto e inviabiliza seu uso para vedação. Os respondentes salientam ainda a dificuldade de competirem nesses segmentos, pois muitos concorrentes utilizam materiais de qualidade, resistência e durabilidade inferiores a baixo custo para ampliarem sua participação no mercado. Outro entrave ao desenvolvimento dessas empresas no país é a inexistência de políticas de incentivo fiscal à produção destes materiais, impossibilitando os fabricantes de possuírem competitividade de preço. Para alavancar esses negócios no Brasil, além do desenvolvimento de políticas públicas de incentivo, é relevante o estabelecimento de centros de P&D para atender a segmentos de crescimento da indústria através de soluções voltadas para o futuro e que podem ser incorporadas rapidamente ao mercado (WACKER, 2017). A Tabela 11 mostra as lacunas de competitividade e as estratégias sugeridas para que este bloco da cadeia de valor apresente maiores índices de competitividade.

Tabela 11 - Lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para Produção da parte estrutural do módulo fotovoltaico

| Lacunas de competitividade  | Estratégias recomendadas   |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diodo de <i>bypass</i></li> <li>• Caixa de junção</li> <li>• <i>Backsheet</i></li> <li>• Filme encapsulante</li> <li>• Vidro especial fotovoltaico</li> <li>• Silicose de vedação</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução da burocracia e carga tributária para garantir a expansão da economia</li> <li>• Estabelecimento de isonomia tributária entre produtos nacionais e importados para competir no mercado internacional</li> <li>• Desenvolvimento de políticas públicas de incentivo para alavancar esses negócios</li> <li>• Estabelecimento de centros de P&amp;D para atender a segmentos crescentes da indústria</li> </ul> |

#### 4.4.3 Produção do módulo fotovoltaico

Módulos fotovoltaicos baseados em *wafer* de silício foram responsáveis por cerca de 95% da produção total de módulos em 2019 (MUKISA et al., 2021). Embora diversos países estejam engajados na fabricação de módulos FV, a China ainda domina o mercado, representando 70% da produção global, seguida pela Coreia do Sul, com 6% de participação (MASSON; KAIZUKA, 2020). Visto isso, o Brasil não figura como um país competitivo quando analisada a manufatura doméstica de módulos fotovoltaicos, pois não consegue atingir os níveis de preço praticados pelos fabricantes asiáticos, que detêm ganhos de escala e benefícios decorrentes da verticalização (ABINEE, 2012). A informação é complementada por Jackson, Lewis e Zhang (2021), que afirmam que as empresas chinesas desempenham papel fundamental na redução dos preços globais dos componentes fotovoltaicos em virtude de sua capacidade de escalar a produção e integrar verticalmente suas cadeias de suprimentos, adotando estratégias de aquisições e desenvolvimento industrial.

No Brasil, David, Buccieri e Rizol (2021) e os entrevistados destacam a inexistência de uma política de incentivo fiscal à produção de módulos fotovoltaicos, pois o mercado é, em sua ampla maioria, atendido com importações. A principal dificuldade recai sobre o preço para o desenvolvimento do produto, tendo em vista que a carga tributária para quem produz no país é muito alta, enquanto os produtos importados são isentos de Imposto de Importação (II) e Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS). Essas medidas estabelecidas pelo governo brasileiro são importantes sob a perspectiva de desenvolvimento da energia fotovoltaica no país, visando a ampliação dessa fonte de energia renovável na matriz elétrica.

Todavia, sob o ponto de vista da indústria nacional, esses incentivos reduzem expressivamente a possibilidade de as empresas apresentarem desempenho sólido e competitivo. Assim, apesar de as fabricantes de módulos nacionais disporem de tecnologias de produção, elas têm sido gradativamente alijadas desse mercado em decorrência da oferta excessiva no mercado internacional aliada à agressividade comercial chinesa e à política industrial brasileira que vem privilegiando a redução de custos dos componentes. Com base nos fatores mencionados, é extremamente difícil haver competitividade neste elo da cadeia de valor em território nacional sem que exista igualdade na tributação de produtos nacionais e importados (DE SOUZA; CAVALCANTE, 2016). A Tabela 12 apresenta as estratégias recomendadas para superar a lacuna de competitividade deste bloco.

Tabela 12 - Lacuna de competitividade e estratégias recomendadas para Produção do módulo fotovoltaico

| <b>Lacuna de competitividade</b>  | <b>Estratégias recomendadas</b>  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Módulo fotovoltaico</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Igualdade na tributação de produtos nacionais e importados para superar a alta carga tributária</li> <li>• Investimentos em infraestrutura e processos para aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção</li> </ul> |

#### **4.4.4 Balanceamento do sistema fotovoltaico**

Este bloco compreende elos dos segmentos *upstream* e *midstream* da cadeia de valor fotovoltaica necessários à produção de matérias-primas e de componentes indispensáveis ao balanceamento do sistema fotovoltaico. Apesar de todos esses elos estarem presentes no Brasil, a competitividade do bloco é considerada moderada. Esse resultado é decorrente de altos níveis de competitividade de fabricantes de *commodities* e outras empresas bem estabelecidas no país associados à baixa competitividade observada principalmente na manufatura de componentes com elevados requisitos tecnológicos e de investimento, como semicondutores de potência, processadores e circuitos integrados.

Dentre os elos que impulsionam a competitividade do bloco de balanceamento do sistema fotovoltaico, destacam-se as indústrias de base, como as produtoras de cimento, aço, alumínio e cobre. A indústria brasileira de cimento está entre as mais eficientes do mundo (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2021b), mas tem sofrido pressão devido ao elevado impacto

ambiental da produção, que exige quantidade expressiva de energia e resulta na emissão de gases de efeito estufa (CHAVES et al., 2021). Para minimizar as emissões e os custos de processo, uma opção viável é a utilização de combustíveis derivados de resíduos na produção (BOURTSALAS et al., 2018). No entanto, os entrevistados mencionam a falta de estímulos ao uso desses combustíveis e de novas tecnologias de eficiência energética, comprometendo a obtenção de índices de competitividade superiores. Além disso, ratificam o exposto por Rigo et al. (2019) e apontam a necessidade de melhoria da malha logística brasileira para atenderem às demandas crescentes dos clientes. As questões relacionadas às emissões de carbono e à logística também são motivo de preocupação entre os fabricantes de aço, que salientam ainda entraves internos culturais e tecnológicos. Dessa forma, a tecnologia baseada em maior automação e conectividade (indústria 4.0) é imprescindível para que a indústria nacional de aço, que foi a 6ª maior exportadora líquida em 2018 (DE SOUZA; PACCA, 2021), se torne mais competitiva.

Na produção de cobre, cabos elétricos e conectores, o Brasil apresenta alta competitividade. No entanto, os entrevistados pontuam a limitação na escala de produção e a circulação de materiais de baixa qualidade no mercado, exigindo normas que garantam a confiabilidade e desempenho dos produtos e uma política industrial que priorize a isonomia tributária. Quanto à produção de alumínio, o país detém conhecimento para promover seus produtos no mercado, porém faltam requisitos e metas voltados à produção sustentável por meio de processos que gerem menos emissões (KIM; TROMP, 2021). Ainda, não há demandas de escala e incentivos ao desenvolvimento da indústria local. Essas dificuldades são compartilhadas com os fabricantes de peças metálicas, estruturas de fixação, quadros e painéis metálicos, que evidenciam também as diferenças de preços praticados nos mercados interno e externo, a inexistência de incentivos fiscais, as garantias financeiras exigidas, a baixa qualidade e a falta de especificação de produtos ofertados por alguns concorrentes (GARLET et al., 2019). Assim, sugerem o desenvolvimento tecnológico nacional e a adequação dos produtos comercializados a uma normatização brasileira para que obtenham ganhos de competitividade diante da concorrência internacional.

A alta competitividade brasileira também pode ser observada na produção de *string box*, terminais de alimentação e comunicação, dispositivos de conversão, proteção e de instalação para os lados de corrente contínua e alternada. Esse nível de competitividade é decorrente de empresas fabricantes bem estabelecidas no país, com produção verticalizada, atuação em diversos segmentos de manufatura e larga escala de fabricação. Contudo, os entrevistados

ressaltam que existem dificuldades que limitam a maior atuação brasileira no mercado internacional e a obtenção de níveis muito altos de competitividade. Dentre os fatores limitantes, destacam-se a dificuldade na aquisição de matéria-prima em virtude da alta demanda global, o “Custo Brasil”, a insegurança normativa e a valoração inadequada dos produtos fornecidos por algumas empresas, que muitas vezes operam abaixo da margem mínima para operação sustentável. Visto isso, os profissionais do setor sugerem medidas para fortalecimento da indústria nacional, como a redução de tributos, a acessibilidade à matéria-prima e à mão de obra qualificada, prazos de entrega reduzidos e produtos comercializados a preços competitivos. Adicionalmente, pontuam a necessidade de maior profissionalização do setor, intensificação de investimentos nacionais, estabilização da economia do país e desenvolvimento tecnológico (GARLET et al., 2020).

Nos elos de produção de borracha, material isolante, policarbonato, plástico e eletroduto, o Brasil apresenta nível moderado de competitividade. O país tem diversas fábricas para produção local desses materiais e possui garantias de desenvolvimento de novas tecnologias, porém concorre com empresas orientais altamente competitivas em termos de preços. Ademais, a desvalorização do real em relação ao dólar, a dificuldade de acesso à matéria-prima a preços competitivos e o mercado com altas barreiras tarifárias limitam a atuação do Brasil no cenário internacional. Os fabricantes de eletrodutos destacam ainda que a falta de materiais em estoque para pronta entrega e os aumentos constantes impostos pelas usinas de aço são entraves à obtenção de competitividade alta no segmento. Desse modo, os respondentes sugerem maior investimento em *marketing* e acesso a financiamentos de capital de giro com taxa de juros internacional para superar as dificuldades observadas. Além disso, os profissionais do setor de plástico propõem a lógica de escalada tarifária no país, que consiste no emprego de tarifas de importação crescentes conforme o grau de processamento de um produto e seu valor agregado (NARAYANAN; KHORANA, 2014). Mores et al. (2018) apontam para a necessidade de o país formular políticas que considerem ciência, tecnologia e inovação para se tornar um *player* proeminente no contexto mundial. De forma complementar, Andreoni e Tregenna (2020) salientam a importância de políticas industriais flexíveis e dinâmicas que apoiem a inovação e a atualização tecnológica como aspectos integrantes do desenvolvimento industrial.

Essas medidas de fortalecimento da indústria nacional são fundamentais para superar o baixo desempenho produtivo do país e a estagnação econômica que perdura há algumas

décadas. O cenário econômico brasileiro ainda não atingiu um estágio de maturidade para se beneficiar das economias de escala percebidas nas estruturas produtivas mais sofisticadas tecnologicamente (NASSIF et al., 2020). Isso fica evidente ao observar os elos de produção doméstica de componentes eletrônicos, sensores, medidor e inversor, que apresentam nível de competitividade moderado para baixo. Ueda, Souza e Menezes (2020) destacam que a situação desses elos é complexa, pois não existem grandes fabricantes no país, sendo necessária a importação de produtos. A afirmação é corroborada pelos entrevistados, que mencionam que esses componentes tendem a ser importados com preços mais agressivos em comparação aos que eventualmente são produzidos no Brasil para a cadeia de valor fotovoltaica. Isso é decorrente dos menores custos envolvidos nos processos de fabricação e alta capacidade produtiva da indústria asiática (MENON; RAVI, 2021) e da falta de incentivo do governo brasileiro para criação da cadeia, uma vez que é muito difícil o desenvolvimento do setor sem forte apoio estatal. Assim, é crucial compreender o custo de importação de insumos e fomentar a indústria nacional, possibilitando que as empresas se estruturam para atender não só ao segmento fotovoltaico como a outros setores altamente dependentes de matéria-prima estrangeira. Além disso, é importante ampliar os investimentos em infraestrutura, tecnologia e processos para aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção.

Dentre os elos com importância estratégica para países em desenvolvimento, mas que restringem a maior projeção brasileira no mercado internacional, destacam-se os fabricantes de materiais magnéticos, display digital de LCD, placas de circuito e elementos de montagem, processadores e circuitos integrados, semicondutores de potência e diodo emissor de luz. Esses segmentos industriais possuem representação discreta no Brasil, pois exigem altos investimentos e domínio tecnológico (LI et al., 2019) e o mercado é atendido majoritariamente por importações de produtos chineses. Além disso, o desenvolvimento de circuitos integrados é liderado por empresas estrangeiras instaladas no país, e as fabricantes de origem nacional não trabalham diretamente com circuito para aplicação à energia fotovoltaica. Quanto à produção de display digital de LCD, os entrevistados afirmam que existem muitas tecnologias disponíveis, aumentando as possibilidades de atuação e conseqüentemente a concorrência. Ainda, existem empresas que seguem a ideia de alto volume de produção e baixo custo, resultando no sucateamento de produtos que são disponibilizados no mercado. Essas informações apontam para a necessidade de maior capital de investimento em equipes de desenvolvimento nacionais e implementação de política pública de incentivo fiscal à

manufatura destes componentes, estimulando empreendedores a apostarem na tecnologia brasileira. Adicionalmente, arranjos colaborativos de P&D podem garantir uma gestão eficaz nesses segmentos industriais, uma vez que o desenvolvimento de inovações na velocidade exigida por esses setores é quase impossível sem acordos de colaboração (FACCIN; BALESTRIN, 2018). A Tabela 13 resume as lacunas de competitividade deste bloco e as estratégias sugeridas para fortalecimento desse segmento no cenário internacional.

Tabela 13 - Lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para Balanceamento do sistema fotovoltaico

| <b>Lacunas de competitividade</b>  | <b>Estratégias recomendadas</b>   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Semicondutores de potência</li> <li>• Materiais magnéticos</li> <li>• Processadores e circuitos integrados</li> <li>• Placas de circuito e elementos de montagem</li> <li>• Display digital de LCD</li> <li>• Diodo emissor de luz</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investimento em equipes de desenvolvimento nacional e tecnologia baseada em maior automação</li> <li>• Acessibilidade a matérias-primas e mão de obra qualificada para fortalecer a indústria nacional</li> <li>• Implementação de política pública de incentivos fiscais à fabricação desses componentes</li> <li>• Estabelecimento de arranjos colaborativos de P&amp;D para garantir uma gestão eficaz nestes segmentos da indústria</li> </ul> |

#### **4.4.5 Integração, operação e manutenção do sistema fotovoltaico**

Integração, operação e manutenção do sistema fotovoltaico consistem em elos altamente competitivos do segmento *downstream* da cadeia de valor brasileira da geração distribuída de energia fotovoltaica. Esse resultado é devido ao número crescente de empresas que oferecem esses serviços e seu forte posicionamento de mercado, à redução de Impostos de Importação para alguns componentes dos sistemas FV e ao valor atribuído pela população ao desenvolvimento econômico sustentável (GARLET et al., 2020). Embora a competitividade desses elos seja alta, os entrevistados apontam algumas dificuldades que enfrentam no cenário nacional, como a falta de capital de investimento, a existência de empresas concorrentes que entregam soluções com valor de serviço inferior ao praticado no mercado, a fiscalização praticamente inexistente quanto ao cumprimento das normas e prazos por parte da agência reguladora em relação às concessionárias de energia elétrica. Além disso, destacam a baixa qualificação da mão de obra disponível no país e a falta de conhecimento dos clientes sobre os diferenciais oferecidos pelas empresas atuantes no mercado, uma vez que os potenciais adotantes do sistema FV frequentemente priorizam custo na tomada de decisão.

Iniciativas para superar as dificuldades e elevar a competitividade da cadeia de valor fotovoltaica brasileira consistem no estabelecimento de padrões de qualidade específicos para integradores de sistemas FV (DAVID; BUCCIERI; RIZOL, 2021), regulamentação do setor e maior controle dos Conselhos Regionais de Engenharia e Agronomia (CREA) sobre as atividades profissionais e projetos desenvolvidos pelas empresas. Ademais, os respondentes salientam a necessidade de maior profissionalização do setor, com qualificação interna das equipes de engenharia, instalação e manutenção, disponibilidade de capital para investimento, estabilização da economia brasileira e intensiva produção nacional de equipamentos. Essas ações fornecem agilidade na entrega de soluções, credibilidade e segurança para os clientes, aumentando a participação da empresa no mercado (GARLET et al., 2020). Os profissionais sugerem ainda a fiscalização mais rígida da ANEEL sobre os processos das concessionárias, especialmente quanto à Resolução Normativa nº 414/2010, que estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica aos consumidores (ANEEL, 2010). A Tabela 14 apresenta as lacunas de competitividade e as estratégias recomendadas para este bloco.

Tabela 14 - Lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para Integração, operação e manutenção do sistema fotovoltaico

| <b>Lacunas de competitividade</b>   | <b>Estratégias recomendadas</b>  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Integração do sistema fotovoltaico</li> <li>• Operação e manutenção do sistema fotovoltaico</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabelecimento de padrões de qualidade específicos para integradores de sistemas fotovoltaicos</li> <li>• Inspeção pelo CREA sobre as atividades profissionais e projetos desenvolvidos pelas empresas</li> <li>• Qualificação interna das equipes de engenharia, instalação e manutenção</li> <li>• Fiscalização da ANEEL sobre os processos das concessionárias</li> </ul> |

#### **4.4.6 Desativação do sistema fotovoltaico**

Neste bloco de competitividade moderada no Brasil, estão inseridos elos do segmento *downstream* da cadeia de valor fotovoltaica, como a desativação do sistema fotovoltaico, a disposição de resíduos e a reciclagem de materiais. Como Garlet et al. (2019) mencionam, existe perspectiva de grande crescimento da energia solar fotovoltaica para atender ao aumento do consumo de eletricidade da população. O resultado dessa expansão do setor será uma enorme quantidade de módulos fotovoltaicos obsoletos adicionada ao fluxo de resíduos em um futuro

próximo. Embora a operação de sistemas FV exiba poluição mínima durante sua vida útil, os impactos ambientais resultantes do descarte de tais sistemas não podem ser ignorados (TAWALBEH et al., 2021). Assim, a gestão e a reciclagem dos sistemas FV devem ser fortemente estimuladas para minimizar o desperdício de recursos ambientais e econômicos (DIAS et al., 2021). No entanto, Rigo et al. (2019) e os respondentes afirmam que no Brasil não há legislação adequada e específica para reciclagem de componentes fotovoltaicos, que é crucial para preservação do meio ambiente.

Medidas para superar o atual estágio de subdesenvolvimento desse segmento da cadeia de valor brasileira relacionam-se à previsão da geração nacional de resíduos FV e ao desenvolvimento de infraestrutura e tecnologias de reciclagem e logística reversa (MAHMOUDI et al., 2019). Os respondentes ressaltam ainda a necessidade de mão de obra especializada na desativação do sistema FV a fim de que os componentes não sejam danificados, preservando o meio ambiente da exposição a substâncias nocivas. Adicionalmente, é fundamental que o governo elabore legislações para gerenciamento, descarte adequado e reciclagem de componentes fotovoltaicos no Brasil. Um exemplo positivo dessa estratégia pode ser observado na União Europeia, que revisou sua legislação sobre Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE) para incluir diretrizes para coleta, transporte e reciclagem de módulos fotovoltaicos, responsabilizando desde 2014 os fabricantes pelo descarte ao final do ciclo de vida do sistema (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2012). A Tabela 15 mostra as estratégias recomendadas para contornar as lacunas de competitividade deste bloco.

Tabela 15 - Lacunas de competitividade e estratégias recomendadas para Desativação do sistema fotovoltaico

| <b>Lacunas de competitividade</b>  | <b>Estratégias recomendadas</b>  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desativação do sistema fotovoltaico</li> <li>• Disposição de resíduos</li> <li>• Reciclagem de materiais</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Previsão da geração nacional de resíduos fotovoltaicos</li> <li>• Desenvolvimento de infraestrutura e tecnologias de reciclagem e logística reversa</li> <li>• Qualificação de mão de obra para desativação do sistema fotovoltaico</li> <li>• Criação de legislação para gerenciamento, descarte adequado e reciclagem de componentes fotovoltaicos</li> </ul> |

#### 4.4.7 Cadeia de valor auxiliar

A cadeia de valor auxiliar fornece suporte para a execução das atividades da estrutura principal e garante a interação entre diferentes empresas e organizações visando o desenvolvimento do setor fotovoltaico (GARLET et al., 2020). Nesse contexto, a ANEEL desempenha papel crucial em todos os elos da cadeia de valor principal através do estabelecimento de regras claras e que permitem a previsibilidade sobre o retorno do investimento, removendo custos injustificados. Além disso, a agência reguladora define a forma de remuneração da energia elétrica injetada na rede pelo consumidor e os requisitos técnicos para a conexão de sistemas fotovoltaicos que devem ser seguidos pelas distribuidoras de energia elétrica e integradores (ANEEL, 2012). Os entrevistados apontam que a regulação passa por um longo e atribulado processo de revisão desde 2018, visando reduzir os subsídios cruzados existentes desde 2012 entre os prosumidores e os consumidores regulares. Essa revisão é fundamental para estabelecer um valor justo de remuneração da eletricidade injetada pelos sistemas fotovoltaicos, evitando o aumento da tarifa para os demais consumidores. Nesse sentido, há um agravante no cenário nacional decorrente da falta de argumentos científicos e uso excessivo de *lobby* político para abordar temas técnicos perante a ANEEL. Caso a revisão da regulação seja impedida por atores políticos, fortemente apoiados pelos empresários do setor fotovoltaico, é difícil haver sustentabilidade econômica do mercado, podendo ter efeitos indesejáveis a médio e longo prazos para todos os consumidores.

O governo brasileiro, de acordo com os respondentes, busca ampliar por meio de políticas públicas a inserção da geração distribuída de energia fotovoltaica na matriz elétrica do país. Uma medida adotada pelo governo do estado do Rio de Janeiro corresponde à isenção, até o fim de 2022, do ICMS cobrado pela energia injetada na rede de distribuição pelos prosumidores (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2020). Outra iniciativa para impulsionar os negócios em um cenário de desvalorização do real consiste na isenção, até o final de 2021, das alíquotas do Imposto de Importação sobre alguns bens de capital, informática e telecomunicação, como módulos fotovoltaicos, inversores e outros acessórios (MINISTÉRIO DA ECONOMIA/CÂMARA DE COMÉRCIO EXTERIOR/COMITÊ-EXECUTIVO DE GESTÃO, 2020a, 2020b, 2020c). Por outro lado, essa medida pode pressionar a competitividade dos fabricantes brasileiros de componentes fotovoltaicos frente aos importados, que já possuem vantagens em termos de custos.

As concessionárias de distribuição brasileiras, por sua vez, estão diretamente ligadas à integração do sistema fotovoltaico e têm investido em pesquisa e desenvolvimento no setor, além de possuírem divisões estratégicas em seus negócios para atenderem exclusivamente clientes interessados em ter sua própria usina solar (DO NASCIMENTO et al., 2020). Os entrevistados destacam que essa relação sólida com os integradores e com os clientes é indispensável para expansão do setor, porém é necessária a viabilização de financiamento de longo prazo para permitir o desenvolvimento de projetos eficientes com propostas de valor mais atrativas aos consumidores (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015). Nesse sentido, os profissionais de instituições financeiras afirmam que são facilitadores do processo, fornecendo diversas condições de financiamento em consultas unificadas (WIJERATNE et al., 2019). No entanto, acreditam que sua contribuição para o aumento da competitividade da indústria fotovoltaica brasileira seria mais intensa com a digitalização de canais para acesso de consulta de crédito e portfólio de produtos de créditos providos de instituições financeiras privadas e públicas.

As instituições de pesquisa e desenvolvimento tecnológico também são agentes importantes no processo de fortalecimento da indústria fotovoltaica nacional, uma vez que são responsáveis pela criação e aprimoramento de tecnologias que agregam valor e competitividade ao mercado (GARLET et al., 2020). Ademais, oferecem formação sólida em ciência e tecnologia e participam ativamente no desenvolvimento de soluções criativas e eficientes através de sua capacidade de inovação e do estabelecimento de parcerias com empresas, agência reguladora e órgãos governamentais. Os entrevistados destacam ainda o papel determinante das universidades na condução de estudos que auxiliem a sociedade quanto à tomada de decisão, mas apontam dificuldades no estreitamento de relações com o mercado e na obtenção de recursos públicos para pesquisa científica e tecnológica em um país com notáveis carências socioeconômicas como o Brasil. Desse modo, requerem maior acesso a recursos para que o país se torne um importante *player* no cenário global de inovação como a China (WALDAU et al., 2018), e sugerem que as universidades devem assumir protagonismo no desenvolvimento de tecnologias, produtos e serviços inovadores e competitivos que atendam às demandas específicas da indústria fotovoltaica brasileira. Além disso, a proximidade com os outros elos da cadeia de valor, a busca por ampla divulgação dos estudos à comunidade e o atendimento aos requisitos do mercado de forma ágil devem ser aprimorados para intensificar as contribuições desses agentes no cenário nacional.

A capacitação de recursos humanos, o suporte em *marketing* e vendas e o fornecimento de serviço de pós-venda ao cliente são impulsionadores de valor para os integradores de sistemas fotovoltaicos. Essa relação entre os diferentes elos, quando estabelecida de forma harmônica, pode resultar em aprimoramento das soluções oferecidas aos potenciais consumidores, bem como no aumento de sua satisfação (VOTTELER; HOUGH; VENTER, 2014). De acordo com os entrevistados, esses elos da cadeia auxiliar possibilitam a oferta de serviços especializados e qualificados, conferindo maior confiabilidade e segurança ao cliente. No que tange às organizações ligadas ao setor fotovoltaico, destaca-se sua atuação e apoio direto a todos os blocos de elos da cadeia de valor principal, por meio da defesa de interesses de seus associados junto a órgãos governamentais, agentes reguladores e entidades de classe. Ainda, os profissionais desse segmento buscam incorporar os conceitos de sustentabilidade, retorno financeiro, segurança jurídica, eficiência energética e previsibilidade de gastos envolvidos na geração distribuída fotovoltaica, auxiliando os diferentes setores da sociedade. Entretanto, a falta de segurança jurídica e regulatória atual e a escassez de estudos estratégicos para cálculo de atributos e benefícios da geração distribuída são motivos de preocupação para os respondentes, pois provocam indecisão no mercado.

Com vistas a reduzir a insegurança jurídica e os riscos e otimizar recursos em negócios fotovoltaicos, escritórios de advocacia têm prestado assistência aos seus clientes em relação às estruturas jurídicas mais adequadas para cada projeto sob as perspectivas societária, contratual, regulatória e tributária (GARLET et al., 2020). Assim, os respondentes alegam possuir experiência na estruturação e desenvolvimento de projetos de geração distribuída, abordando com profundidade temas legais da indústria fotovoltaica, e defendem regras que respeitam o direito adquirido e os contratos assinados de seus clientes. Adicionalmente, buscam encontrar as melhores soluções para antecipação aos obstáculos experimentados pelo mercado fotovoltaico.

Quanto à segurança do consumidor sobre a operação e manutenção de seu sistema fotovoltaico, empresas têm ampliado sua gama de atuação e oferecido seguro para proteção do patrimônio e redução de prejuízos em eventuais acidentes (KHAWAJA; GHAIH; ALKHALIDI, 2021). Segundo os profissionais, essa medida é importante para agregar valor e confiabilidade na performance do sistema, aumentando sua credibilidade perante o cliente e, conseqüentemente, o potencial de comercialização da tecnologia. No entanto, salientam a necessidade de conscientização da população e dos demais elos da cadeia de valor sobre o

serviço oferecido pelas seguradoras, que pode garantir maior tranquilidade ao setor. Por outro lado, as empresas de transporte e logística contribuem para o aumento da competitividade da indústria fotovoltaica nacional através de entregas ágeis em todos os elos da cadeia de valor principal e soluções de armazenamento de equipamentos em unidades estrategicamente localizadas no Brasil. Além disso, os entrevistados pontuam o papel ativo das transportadoras na coleta de sistemas FV desativados, auxiliando na logística reversa e contribuindo para a sustentabilidade dessa tecnologia.

#### 4.5 CONCLUSÕES

Com os avanços econômicos e intensas mudanças tecnológicas, a competição de mercado na indústria fotovoltaica está se tornando cada vez mais acirrada (LIU et al., 2020). Assim, o estabelecimento de uma cadeia de valor com a integração de *stakeholders* desde a fabricação de matérias-primas até a desativação do sistema FV é crucial para a criação de conexões e discussões políticas e estratégicas que possibilitem impulsionar a geração distribuída de energia fotovoltaica. Nesse contexto, o presente estudo analisou, pela primeira vez na literatura, a cadeia de valor desta fonte de energia renovável no Brasil, identificando a competitividade das empresas nacionais perante o cenário global e apontando as dificuldades que limitam a indústria FV brasileira de competir satisfatoriamente no mercado internacional. Além disso, a pesquisa apresentou estratégias para superar as barreiras existentes e fortalecer o mercado nacional a partir de informações obtidas na literatura e em entrevistas com 87 profissionais inseridos em todos os elos da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no país. Os resultados apresentados nesse artigo contribuem para a identificação de elos que alavancam ou comprometem o desenvolvimento e competitividade do setor no Brasil, que até então não havia tido sua indústria FV analisada de forma completa mesmo com seu crescimento na capacidade instalada.

No contexto global, o Brasil apresenta maiores níveis de competitividade nos elos referentes às indústrias de base, enquadradas no segmento *upstream* da cadeia de valor fotovoltaica. No entanto, o número reduzido de acordos comerciais é um entrave à participação brasileira em cadeias de valor globais, sendo necessária uma maior integração com o comércio internacional através da redução de barreiras e tarifas, possibilitando que o país obtenha ganhos de competitividade industrial (ARAÚJO; PEROBELLI; FARIA, 2021). Essa medida também

é requisitada pelos segmentos *midstream* e *downstream* da cadeia, visto que as principais dificuldades enfrentadas pela indústria FV brasileira estão associadas aos altos custos para produzir no país, à carga tributária elevada e à falta de incentivos para o desenvolvimento da cadeia produtiva. Ademais, o país carece de fiscalização de requisitos mínimos para os produtos comercializados em território nacional, que geram concorrência desleal quanto aos custos de fabricação.

Dentre as lacunas de competitividade da indústria FV brasileira, destacam-se os elos de produção de lingotes e *wafers* de silício grau solar, célula e módulo FV, caixa de junção, *backsheet*, filme encapsulante, vidro especial fotovoltaico e componentes intensivos em capital e tecnologia. Assim, é fundamental que o governo brasileiro implemente políticas públicas de incentivo fiscal à manufatura destes componentes, atraindo investidores e facilitando o acesso a capital de investimento para equipes de pesquisa e desenvolvimento nacionais. Adicionalmente, é indispensável o estabelecimento de arranjos colaborativos internacionais para garantir agilidade em processos inovadores e fortalecer as empresas domésticas. Ressalta-se ainda a necessidade de relações sólidas e estreitas entre os diversos elos das cadeias de valor principal e auxiliar no Brasil para amadurecimento do setor fotovoltaico.

No atual cenário nacional, conexões harmônicas e discussões entre os distintos *stakeholders* se tornam ainda mais importantes para definição de estratégias econômicas, gerenciais, políticas, mercadológicas e sociais para minimizar possíveis impactos decorrentes da proposta de criação de um Marco Legal para Micro e Mini Geração Distribuída que está tramitando no Congresso Nacional e da revisão regulatória sugerida pela ANEEL visando a sustentabilidade econômica do mercado. Além disso, a interação entre os *players* da cadeia de valor é crucial para planejamento e definição de estratégias direcionadas ao fortalecimento da indústria nacional para superar problemas de desabastecimento e aumento de preços dos equipamentos fotovoltaicos em decorrência da crise energética experimentada pela China em 2021, que tem impactado a cadeia produtiva de diversos segmentos devido às exigências do governo para descarbonizar a economia.

Sob a perspectiva acadêmica, o estudo expande a pesquisa de Garlet et al. (2020) ao diagnosticar a competitividade dos diferentes atores da cadeia de valor e indicar os principais elos e fatores a serem trabalhados para difundir a energia FV. Ainda, complementa os estudos de Garlet et al. (2019) ao apontar a necessidade de criação de ambiente colaborativo para superar barreiras de mercado e de Jäger-Waldau et al. (2020) ao fornecer estratégias de

desenvolvimento para toda a cadeia de valor fotovoltaica. Os resultados apresentados nesse artigo contribuem também para que acadêmicos, formuladores de políticas, reguladores e profissionais envolvidos na cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica desenvolvam ações efetivas para aumentar a competitividade do setor e a participação dessa fonte na matriz elétrica brasileira. Além disso, servem de base para pesquisas futuras na área, que podem analisar a competitividade da cadeia de valor FV em outras economias emergentes e realizar possíveis comparações, sugerindo políticas e ações conjuntas entre os países.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [números de concessão 142448/2018-4, 308723/2017-1, 311926/2017-7 e 465640/2014-1], Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) [número de concessão 23038.000776/2017-54] e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) [número de concessão 17/2551-0000517-1]. Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPERGS e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Geração Distribuída (INCT-GD) por apoiarem esta pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa ANEEL Nº 414, de 9 de Setembro de 2010**. Brasil, 2010. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf/3bd33297-26f9-4ddf-94c3-f01d76d6f14a?version=1.0>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa ANEEL Nº 482, de 17 de Abril de 2012**. Brasil, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Geração Distribuída**. 2021. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTlIMjItN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 25 out. 2021.

- ANDREONI, A.; TREGENNA, F. Escaping the middle-income technology trap: A comparative analysis of industrial policies in China, Brazil and South Africa. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 54, p. 324–340, 2020.
- ARAÚJO, I. F.; PEROBELLI, F. S.; FARIA, W. R. Regional and global patterns of participation in value chains: Evidence from Brazil. **International Economics**, v. 165, p. 154–171, 2021.
- ASHKENAZI, D. How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 143, p. 101–113, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. Brasil, 2012. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- BARTIE, N. J. et al. The resources, exergetic and environmental footprint of the silicon photovoltaic circular economy: Assessment and opportunities. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, p. 105516, 2021.
- BINZ, C.; TANG, T.; HUENTELER, J. Spatial lifecycles of cleantech industries – The global development history of solar photovoltaics. **Energy Policy**, v. 101, p. 386–402, 2017.
- BOURTSALAS, A. C. et al. Use of non-recycled plastics and paper as alternative fuel in cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 8–16, 2018.
- CELLARD, A. **A Análise Documental**. In: A pesquisa qualitativa: Enfoques epistemológicos e metodológicos. Petrópolis, RJ: Editora Vozes, 2008, 316 p.
- CÉSAR, A. S. et al. Hydrogen productive chain in Brazil: An analysis of the competitiveness' drivers. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 751–763, 2019.
- CHAVES, G. L. D. et al. Synergizing environmental, social, and economic sustainability factors for refuse derived fuel use in cement industry: A case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 288, p. 112401, 2021.
- CHEN, Z.; SU, S. I. I. Multiple competing photovoltaic supply chains: Modeling, analyses and policies. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1274–1287, 2018.
- CHOUDHARY, P.; SRIVASTAVA, R. K. Sustainability perspectives- a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 589–612, 2019.

- CHUNG, M. H. Potential analysis of a target area selection for photovoltaic-based distributed generation in cases of an existing city in Korea. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 341–348, 2018.
- CURTIUS, H. C. The adoption of building-integrated photovoltaics: barriers and facilitators. **Renewable Energy**, v. 126, p. 783–790, 2018.
- DAUD, S. et al. A comparison of heuristic optimization techniques for optimal placement and sizing of photovoltaic based distributed generation in a distribution system. **Solar Energy**, v. 140, p. 219–226, 2016.
- DAVID, T. M.; BUCCIERI, G. P.; RIZOL, P. M. S. R. Photovoltaic systems in residences: A concept of efficiency energy consumption and sustainability in brazilian culture. **Journal of Cleaner Production**, v. 298, p. 126836, 2021.
- DE FARIA JR., H.; TRIGOSO, F. B. M.; CAVALCANTI, J. A. M. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 469–475, 2017.
- DE SOUZA, J. F. T.; PACCA, S A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, p. 105517, 2021.
- DE SOUZA, L. E. V.; CAVALCANTE, A. M. G. Towards a sociology of energy and globalization: Interconnectedness, capital, and knowledge in the Brazilian solar photovoltaic industry. **Energy Research and Social Science**, v. 21, p. 145–154, 2016.
- DIAS, P. et al. Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination – technical, environmental and economic analyses. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 165, p. 105241, 2021.
- DO NASCIMENTO, F. M. et al. Factors for measuring photovoltaic adoption from the perspective of operators. **Sustainability**, v. 12, n. 8, p. 3184, 2020.
- ELGAMAL, G. N. G.; DEMAJOROVIC, J. Barriers and perspectives for electric power generation out of photovoltaic solar panels in the brazilian energy matrix. **Journal of Environmental Management and Sustainability**, v. 9, n. 1, p. 1–26, 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional: ano base 2020**. Brasília - DF. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>>. Acesso em: 27 set. 2021.

FACCIN, K.; BALESTRIN, A. The dynamics of collaborative practices for knowledge creation in joint R&D projects. **Journal of Engineering and Technology Management - JET-M**, v. 48, p. 28–43, 2018.

FERREIRA, A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181–191, 2018.

FRANK, A. G. et al. The effect of innovation activities on innovation outputs in the Brazilian industry: Market-orientation vs. technology-acquisition strategies. **Research Policy**, v. 45, n. 3, p. 577–592, 2016.

FRAZÃO, A. G. L. **Custo Brasil: Uma análise sobre alguns fatores que impactam no processo produtivo brasileiro e que tornam a fabricação de produtos e os investimentos no Brasil mais caros**. Centro Universitário Unichristus, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.unichristus.edu.br/jspui/handle/123456789/1084>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

GARLET, T. B. et al. Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 157-169, 2019.

GARLET, T. B. et al. Value chain in distributed generation of photovoltaic energy and factors for competitiveness: A systematic review. **Solar Energy**, v. 211, p. 396-411, 2020.

GREEN, B. N.; JOHNSON, C. D.; ADAMS, A. Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: secrets of the trade. **Journal of Chiropractic Medicine**, v. 5, n. 3, p. 101-117, 2006.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Lei nº 8922 de 30 de Junho de 2020**. Rio de Janeiro - RJ, 2020. Disponível em: <[http://www.fazenda.rj.gov.br/sefaz/faces/oracle/webcenter/portalapp/pages/navigation-renderer.jspx?\\_afLoop=30058732029361840&datasource=UCMServer%23dDocName%3AWCC42000009178&\\_adf.ctrl-state=k2sl8drq5\\_9](http://www.fazenda.rj.gov.br/sefaz/faces/oracle/webcenter/portalapp/pages/navigation-renderer.jspx?_afLoop=30058732029361840&datasource=UCMServer%23dDocName%3AWCC42000009178&_adf.ctrl-state=k2sl8drq5_9)>. Acesso em: 17 jul. 2021.

GUO, Q.; KLUSE, C. Development of the Photovoltaics Recycling Network. **Advanced Energy Conversion Materials**, v. 1, n. 1, p. 25–29, 2020.

HA, Y. H. et al. Assessing the impact of R&D policy on PV market development: The case of South Korea. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 9, n. 2, p. e366, 2020.

HAJDUKIEWICZ, A.; PERA, B. International trade disputes over renewable energy—the case

- of the solar photovoltaic sector. **Energies**, v. 13, n. 2, p. 500, 2020.
- HALEY, U. C. V; SCHULER, D. A. Government Policy and Firm Strategy in the Solar Photovoltaic Industry. **California Management Review**, v. 54, n. 1, p. 17-38, 2011.
- HEIDEIER, R. et al. Impacts of photovoltaic distributed generation and energy efficiency measures on the electricity market of three representative Brazilian distribution utilities. **Energy for Sustainable Development**, v. 54, p. 60–71, 2020.
- HIPP, A.; BINZ, C. Firm survival in complex value chains and global innovation systems: Evidence from solar photovoltaics. **Research Policy**, v. 49, n. 1, p. 103876, 2020.
- HOSS, M.; CATEN, C. S. Processo de validação interna de um questionário em uma survey research sobre ISO 9001:2000. **Produto & Produção**, v. 11, n. 2, 2010.
- HUGHES, L.; MECKLING, J. Policy competition in clean technology: Scaling up or innovating up? **Business and Politics**, v. 20, n. 4, p. 588–614, 2018.
- JACKSON, M. M.; LEWIS, J. I.; ZHANG, X. A green expansion: China's role in the global deployment and transfer of solar photovoltaic technology. **Energy for Sustainable Development**, v. 60, p. 90–101, 2021.
- JÄGER-WALDAU, A. et al. How photovoltaics can contribute to GHG emission reductions of 55% in the EU by 2030. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 126, p. 109836, 2020.
- JIA, F.; SUN, H.; KOH, L. Global solar photovoltaic industry: An overview and national competitiveness of Taiwan. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 550–562, 2016.
- JUNTUNEN, J. K.; HYYSALO, S. Renewable micro-generation of heat and electricity—Review on common and missing socio-technical configurations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 857–870, 2015.
- KAPOOR, R.; FURR, N. R. Complementarities and competition: Unpacking the drivers of entrants' technology choices in the solar photovoltaic industry. **Strategic Management Journal**, v. 36, n. 3, p. 416–436, 2015.
- KARAKAYA, E.; SRIWANNAWIT, P. Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 60–66, 2015.
- KHAWAJA, M. K.; GHAITH, M.; ALKHALIDI, A. Public-private partnership versus extended producer responsibility for end-of-life of photovoltaic modules management policy. **Solar Energy**, v. 222, p. 193–201, 2021.
- KIM, T. J.; TROMP, N. Carbon emissions embodied in China-Brazil trade: Trends and driving

- factors. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126206, 2021.
- KLITKOU, A.; COENEN, L. The Emergence of the Norwegian Solar Photovoltaic Industry in a Regional Perspective. **European Planning Studies**, v. 21, n. 11, p. 1796–1819, 2013.
- LEE, K. et al. Exploring Suitable Technology for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) Based on a Hidden Markov Model Using Patent Information and Value Chain Analysis. **Sustainability**, v. 9, n. 7, p. 1100, 2017.
- LI, H. et al. Innovation efficiency of semiconductor industry in China: A new framework based on generalized three-stage DEA analysis. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 66, p. 136–148, 2019.
- LI, H. et al. Research on the policy route of China's distributed photovoltaic power generation. **Energy Reports**, v. 6, p. 254–263, 2020.
- LIU, J. et al. Study on coupling optimization model of node enterprises for energy storage-involved photovoltaic value chain in China. **Energy Reports**, v. 6, s. 7, p. 69-81, 2020.
- LIU, J.; LIN, X. Empirical analysis and strategy suggestions on the value-added capacity of photovoltaic industry value chain in China. **Energy**, v. 180, p. 356–366, 2019.
- LÜDKE, M. C. **A rota metalúrgica do silício: da extração do quartzo à obtenção do silício de grau fotovoltaico**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Araranguá -SC, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/188037>>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- MAHMOUDI, S. et al. End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 1-16, 2019.
- MALTERUD, K.; SIERSMA, V. D.; GUASSORA, A. D. Sample Size in Qualitative Interview Studies: Guided by Information Power. **Qualitative Health Research**, v. 26, p. 1753–1760, 2016.
- MASSON, G.; KAIZUKA, I. **IEA PVPS report - Trends in Photovoltaic Applications 2020**. International Energy Agency (IEA), 2020. Disponível em: <[www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)>. Acesso em: 17 jun. 2021.
- MATHEWS, J. A.; HU, M. C.; WU, C. Y. Fast-follower industrial dynamics: The case of Taiwan's emergent solar photovoltaic industry. **Industry and Innovation**, v. 18, n. 2, p. 177–202, 2011.
- MECKLING, J.; HUGHES, L. Globalizing solar: Global supply chains and trade preferences. **International Studies Quarterly**, v. 61, n. 2, p. 225–235, 2017.

MENON, R. R.; RAVI, V. Analysis of barriers of sustainable supply chain management in electronics industry: An interpretive structural modelling approach. **Cleaner and Responsible Consumption**, v. 3, p. 100026, 2021.

MING, Z. et al. Is the “sun” still hot in China? the study of the present situation, problems and trends of the photovoltaic industry in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 1224–1237, 2015.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA/CÂMARA DE COMÉRCIO EXTERIOR/COMITÊ-EXECUTIVO DE GESTÃO. **Resolução nº 14, de 19 de Fevereiro de 2020**. Brasil, 2020a. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-14-de-19-de-fevereiro-de-2020-244299731>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA/CÂMARA DE COMÉRCIO EXTERIOR/COMITÊ-EXECUTIVO DE GESTÃO. **Resolução nº 69, de 16 de Julho de 2020**. Brasil, 2020b. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-69-de-16-de-julho-de-2020-267580785>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA/CÂMARA DE COMÉRCIO EXTERIOR/COMITÊ-EXECUTIVO DE GESTÃO. **Resolução nº 70, de 16 de Julho de 2020**. Brasil, 2020c. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-70-de-16-de-julho-de-2020-267580871>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I. Development of silicon solar cells and photovoltaic modules in Brazil: Analysis of a pilot production. **Materials Research**, v. 15, n. 4, p. 581–588, 2012.

MORES, G. V. et al. Sustainability and innovation in the Brazilian supply chain of green plastic. **Journal of Cleaner Production**, v. 177, p. 12–18, 2018.

MUKISA, N. et al. Multi criteria analysis ranking of solar photovoltaic modules manufacturing countries by an importing country: A case of Uganda. **Solar Energy**, v. 223, p. 326–345, 2021.

NARAYANAN, G. B.; KHORANA, Sangeetha. Tariff escalation, export shares and economy-wide welfare: A computable general equilibrium approach. **Economic Modelling**, v. 41, p. 109–118, 2014.

NASSIF, A. et al. Economic development and stagnation in Brazil (1950–2011). **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 53, p. 1–15, 2020.

OLIVEIRA NETO, G. C. et al. Framework to overcome barriers in the implementation of cleaner production in small and medium-sized enterprises: Multiple case studies in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 50–62, 2017.

- QUITZOW, R. Dynamics of a policy-driven market: The co-evolution of technological innovation systems for solar photovoltaics in China and Germany. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 17, p. 126–148, 2015.
- REN, F.-R. et al. Analysis of CO<sub>2</sub> emission reduction contribution and efficiency of China's solar photovoltaic industry: Based on Input-output perspective. **Energy**, v. 199, p. 117493, 2020.
- RIGO, P. D. et al. Is the success of small-scale photovoltaic solar energy generation achievable in Brazil? **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118243, 2019.
- RIGO, P. D. et al. A model for measuring the success of distributed small-scale photovoltaic systems projects. **Solar Energy**, v. 205, p. 241–253, 2020.
- ROSA, C. B. et al. Mathematical modeling for the measurement of the competitiveness index of Brazil south urban sectors for installation of photovoltaic systems. **Energy Policy**, v. 136, p. 111048, 2020.
- SAMPAIO, P. G. V; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590–601, 2017.
- SÉRGIO, P. et al. **A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?** Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Rio de Janeiro – RJ, 2014. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2901>>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. Brasília - DF. Disponível em: <[www.sebrae.com.br](http://www.sebrae.com.br)>. Acesso em: 22 jan. 2020.
- SHUAI, J. et al. Are China's solar PV products competitive in the context of the Belt and Road Initiative? **Energy Policy**, v. 120, p. 559–568, 2018.
- SHUBBAK, M. H. Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109383, 2019.
- SILVA, L. A. et al. Copper: Industrial production and applications. **Química Nova**, v. 42, n. 10, p. 1154–1161, 2019.
- SU, Y.-S. Competing in the Global Solar Photovoltaic Industry: The Case of Taiwan. **International Journal Of Photoenergy**, v. 2013, p. 1-11, 2013.
- TABELIN, C. B. et al. Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental

aspects, and sustainability issues. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 170, p. 105610, 2021.

TAWALBEH, M. et al. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. **Science of the Total Environment**, v. 759, p. 143528, 2021.

THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)**. European Parliament, 2012. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:en:PDF>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Aluminum**. U. S. Geological Survey, 2021a. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-aluminum.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Cement**. U. S. Geological Survey, 2021b. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-cement.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2021.

UEDA, R. M.; SOUZA, A. M.; MENEZES, R. M. C. P. How macroeconomic variables affect admission and dismissal in the Brazilian electro-electronic sector: A VAR-based model and cluster analysis. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 557, p. 124872, 2020.

VOTTELER, R.; HOUGH, J.; VENTER, C. An analysis of the solar service provider industry in the Western Cape, South Africa. **Journal Of Energy In Southern Africa**, v. 25, n. 2, p. 70–80, 2014.

WACKER. Wacker expands silicones production in Brazil; opens US research centre. **Focus on Surfactants**, v. 2017, n. 8, p. 7, 2017.

WALDAU, A. J. et al. Drifting towards innovation: The co-evolution of patent networks, policy, and institutions in China's solar photovoltaics industry. **Energy Policy**, v. 8, n. 1, p. 69–80, 2018.

WIJERATNE, W. M. Pabasara U. et al. Design and development of distributed solar PV systems: Do the current tools work? **Sustainable Cities And Society**, v. 45, p. 553–578, 2019.

ZHANG, F.; GALLAGHER, K. S. Innovation and technology transfer through global value chains: Evidence from China's PV industry. **Energy Policy**, v. 94, p. 191–203, 2016.

ZHAO, Z.-Y.; ZHANG, S.-Y.; ZUO, J. A critical analysis of the photovoltaic power industry in China - From diamond model to gear model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4963–4971, 2011.

**APÊNDICE A.1 – QUESTIONÁRIO PARA PROFISSIONAIS ENVOLVIDOS NA CADEIA DE VALOR PRINCIPAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL**

*1. Diagnóstico da competitividade*

1.1. Em qual(is) elo(s) da cadeia de valor se enquadra a empresa em que você trabalha?

1.2. Como você avalia a competitividade do seu elo na cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica?

Inexistente       Baixa       Moderada       Alta       Muito alta

1.3. Que fatos levam à avaliação anterior?

1.4. Que nível de confiança você atribui à avaliação anterior?

Muito baixo       Baixo       Moderado       Alto       Muito alto

1.5. A empresa em que você trabalha se adapta facilmente às mudanças no mercado?

1.6. Quais são os diferenciais da empresa em que você trabalha que agregam valor aos clientes?

1.7. Caso a resposta para a questão 1.2 tenha sido diferente de “Muito alta”, quais são as principais dificuldades que limitam a competitividade da empresa em que você trabalha?

1.8. Caso a resposta para a questão 1.2 tenha sido diferente de “Muito alta”, o que seria necessário para que a competitividade da empresa em que você trabalha obtivesse avaliação superior?

*2. Identificação*

2.1. Qual é o nome da empresa em que você trabalha?

2.2. Em que estado(s) atua a empresa em que você trabalha?

2.3. Qual é a sua função/cargo na empresa?

2.4. Há quanto tempo você trabalha na empresa?

## **APÊNDICE A.2 – QUESTIONÁRIO PARA PROFISSIONAIS ENVOLVIDOS NA CADEIA DE VALOR AUXILIAR DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL**

### *1. Compreensão das relações entre as cadeias de valor principal e auxiliar*

- 1.1. Em qual(is) elo(s) da cadeia de valor auxiliar se enquadra a empresa/organização em que você trabalha?
- 1.2. Com qual(is) elo(s) da cadeia de valor principal a empresa/organização em que você trabalha está diretamente relacionada?
- 1.3. De que forma a empresa/organização em que você trabalha contribui para aumentar a competitividade do(s) elo(s) da cadeia de valor principal selecionado(s) na questão 1.2?
- 1.4. Quais são os diferenciais da empresa/organização em que você trabalha que agregam valor aos clientes que visam adotar sistemas fotovoltaicos?
- 1.5. Quais são as principais dificuldades que limitam a relação da empresa/organização em que você trabalha com o(s) elo(s) da cadeia de valor principal selecionado(s) na questão 1.2?
- 1.6. O que poderia ser feito para que a empresa/organização em que você trabalha pudesse contribuir de forma mais intensa para o aumento da competitividade da indústria fotovoltaica brasileira?

### *2. Identificação*

- 2.1. Qual é o nome da empresa/organização em que você trabalha?
- 2.2. Em que estado(s) atua a empresa/organização em que você trabalha?
- 2.3. Qual é a sua função/cargo na empresa/organização?
- 2.4. Há quanto tempo você trabalha na empresa/organização?

## 5 CONCLUSÕES

Os desenvolvimentos econômico, tecnológico e social exigem demandas crescentes de eletricidade, que vêm sendo resolvidas com a intensificação da implantação de fontes de geração de energia renováveis e diversificadas (MASTROCINQUE et al., 2020). Nesse cenário, a geração distribuída de energia fotovoltaica desempenha papel fundamental para atender à parte da demanda por energia elétrica e tem sido considerada uma opção atrativa para superar os consecutivos aumentos da tarifa de eletricidade e a crise hídrica vivenciada pelo Brasil em 2021. Além disso, governo, instituições e empresas estão sendo pressionados a alcançarem a sustentabilidade sob os pilares econômico, ambiental e social, sendo a adoção fotovoltaica um caminho para a transição em direção a um futuro sustentável.

Embora a geração distribuída fotovoltaica esteja se desenvolvendo e apresente perspectiva de crescimento, existem problemas de naturezas técnica, econômica, social, gerencial e política que podem limitar sua difusão e competitividade (DOS SANTOS; CANHA; BERNARDON, 2018). Assim, é particularmente importante analisar a cadeia de valor do setor para explorar a condição dos seus elos e identificar ações que possam conduzir à melhoria da competitividade da indústria fotovoltaica brasileira perante o mercado global (LIU et al., 2020). Nesse contexto, a presente tese sugere, a partir da elaboração de três artigos complementares, que redes de relacionamento sejam estabelecidas entre os distintos *stakeholders* do setor para definição de ações de curto, médio e longo prazos que visem desenvolver o mercado interno e alcançar o potencial de geração FV existente no país.

Para estabelecer estratégias de fortalecimento da cadeia de valor fotovoltaica, inicialmente é necessário compreender o cenário nacional no que tange à geração distribuída dessa fonte de energia renovável. Dessa forma, o Artigo 1 identificou o panorama do setor e abordou perspectivas futuras e barreiras à adoção e difusão da tecnologia na realidade brasileira. Paralelamente, o Artigo 2 mapeou os elos que compõem a cadeia de valor do segmento e os fatores que influenciam sua competitividade, buscando auxiliar os *stakeholders* a expandirem o mercado e fornecer embasamento para a condução do último artigo proposto por esta tese. Apoiado nos trabalhos anteriores, o Artigo 3 permitiu identificar os elos da cadeia FV presentes no contexto brasileiro e diagnosticar suas posições competitivas perante o mercado global, fornecendo direcionamentos para preenchimento de lacunas e amadurecimento do setor fotovoltaico nacional.

Por meio dos estudos descritos, esta tese respondeu às questões de pesquisa propostas e atendeu ao objetivo geral de diagnosticar a competitividade da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil. Os achados trazem contribuições adicionais aos estudos anteriores sobre o tema, constituindo um projeto original, singular e de relevância para acadêmicos, pesquisadores, formuladores de políticas, reguladores, empresários e investidores. A pesquisa contém análises complexas e estruturadas do setor fotovoltaico nacional, que até então não havia sido analisado de forma abrangente e detalhada, e apresenta caminhos e estratégias para impulsionar oportunidades nessa área fundamental para a transição energética no país.

Os resultados apontam que a cadeia de valor fotovoltaica brasileira tende a ser mais desenvolvida nas extremidades, com mineradoras e indústrias de base bem estabelecidas no segmento *upstream* e com empresas mais diretamente ligadas ao consumidor final e competitivas no segmento *downstream*. Essa situação é observada não só no setor fotovoltaico, mas na indústria brasileira como um todo. Ao analisar o índice de complexidade econômica, verificou-se uma redução no conhecimento produtivo nacional na última década. Os setores primários aumentaram gradualmente sua participação na cartela de exportações brasileira e a indústria não associada aos produtos primários enfrenta limitações para manter sua participação no conjunto de exportações. Além disso, os segmentos de baixa, média e alta tecnologia regrediram ou estagnaram nos últimos anos, apontando que o país não conseguiu completar a transformação estrutural da sua economia.

O Brasil reúne um conjunto de fatores que desestimulam o empreendedorismo e a atividade produtiva, o que acaba interferindo na competitividade e crescimento das empresas. Esses fatores estão relacionados à burocracia excessiva, à elevada carga tributária e ao Custo Brasil. Assim, para se inserir mais fortemente no mercado internacional, o país deve conduzir reformas administrativas e tributárias e adotar uma política industrial de longo prazo que vise o aumento da produtividade e a criação de um ambiente favorável aos negócios. É fundamental que os formuladores de políticas desenvolvam ações voltadas à produção de bens de média e alta complexidade a fim de evitar uma regressão na produtividade e competitividade nacional. O Brasil carece de uma economia estruturada para que minimize custos logísticos e de energia elétrica e direcione maiores investimentos públicos e privados para ciência e tecnologia, desempenhando um papel estratégico no fortalecimento da sua indústria.

## 5.1 CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS

A literatura acerca da geração distribuída de energia fotovoltaica evoluiu substancialmente ao longo dos últimos anos, com incremento de diversos materiais e conteúdos à medida que a tecnologia foi amadurecendo e assumindo papel importante na transição energética mundial. Nesse sentido, muitos estudos buscaram inicialmente ampliar o conhecimento técnico associado a essa fonte de energia renovável, com avanços tecnológicos em módulos fotovoltaicos e demais componentes dos sistemas visando o aumento de eficiência e a redução de custos. Por outro lado, as pesquisas relacionadas à gestão de energia fotovoltaica, englobando aspectos políticos, econômicos, mercadológicos, sociais e técnicos, são mais recentes, especialmente no Brasil, que teve progresso tardio no setor em comparação a países desenvolvidos (DE SOUZA; CAVALCANTE, 2016).

Nesse contexto, a presente tese buscou aprofundar os conhecimentos de cunho gerencial do mercado de geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil através de técnicas como revisão sistemática da literatura, análise de conteúdo e entrevistas individuais com especialistas. Esses procedimentos metodológicos possibilitaram o alcance de evidências importantes referentes ao cenário fotovoltaico brasileiro e aos níveis de competitividade observados nos elos da cadeia de valor do setor, que até então não haviam sido analisados de forma abrangente. Além disso, esta pesquisa expande os achados de Rosa et al. (2020) ao estimular a análise de mercado pelos *stakeholders* e identificar desafios e oportunidades para o crescimento FV no Brasil. A tese corrobora os resultados de Zhang e Gallagher (2016), afirmando que o desenvolvimento das energias limpas no país é mais provável de ocorrer quando as empresas do setor possuem maior capacidade tecnológica e quando as barreiras às transações de mercado são reduzidas.

Esta pesquisa preencheu lacunas na literatura de geração distribuída fotovoltaica através da análise dos principais atores do setor, fatores críticos à sua competitividade e da dinâmica de negócios entre os elos das cadeias de valor principal e auxiliar, ampliando as reflexões propostas pelo estudo de Chen e Su (2018) e facilitando o desenvolvimento desses *stakeholders*. Ademais, a metodologia de pesquisa desta tese está em consonância com o artigo conduzido por De Souza e Cavalcante (2016), que estimula o desenvolvimento de trabalhos aplicados e direcionados à compreensão da indústria FV brasileira sob a perspectiva da dinâmica mundial do mercado de energias renováveis. Assim, a indústria fotovoltaica brasileira foi investigada a

partir de uma análise global, identificando o impacto de estratégias internacionais, como a política industrial adotada pela China, na competitividade e desenvolvimento do mercado interno.

Considerando o contexto cada vez mais competitivo da economia contemporânea, esta tese defende que a inovação sustentável, por meio de práticas de baixo impacto ambiental como a geração distribuída de energia fotovoltaica, pode gerar vantagem competitiva para as empresas e proporcionar o desenvolvimento nacional (MEDEIROS; RIBEIRO; CORTIMIGLIA, 2014). Dessa forma, contribui para a literatura de sustentabilidade ao indicar que os diferentes elos envolvidos na cadeia de valor fotovoltaica são impulsionadores para a conscientização ambiental dos consumidores e empresas. Adicionalmente, a observação de fatores limitantes e impulsionadores de mercado amplificam o valor da aprendizagem em toda a cadeia de valor, possibilitando ganhos e desenvolvimento sustentável aos diferentes atores (DUNG et al., 2021).

Esta pesquisa apresenta uma metodologia única para mapeamento de elos e análise da competitividade de um setor específico, podendo orientar pesquisadores que desejam avançar os estudos sobre cadeia de valor em diferentes áreas. Além disso, os resultados contribuem para a gestão da cadeia de valor através do envolvimento de diversas lentes teóricas, demonstrando que fatores contingenciais, ações de *stakeholders*, complexidades e capacidades dinâmicas influenciam o cenário fotovoltaico. Observando a teoria contingencial, a tese indica que o aumento da prática de inovações sustentáveis, como a geração fotovoltaica, se deve a um ambiente externo em mudança, sendo frequentes as alterações de cunho político e mercadológico (LAWRENCE; LORSCH, 1967). Este estudo demonstra avanços em relação à teoria dos *stakeholders*, afirmando que a visão de longo prazo e aspectos sustentáveis são determinantes para análises de gestão e de cadeia de valor (FREEMAN, 1999). Quanto à teoria da complexidade, os achados sugerem que as mudanças tendem a se desdobrar através de padrões de interação, sendo interessante observar os movimentos necessários para difundir a geração fotovoltaica a partir de relações que envolvem todos os elos em um setor (MORIN, 2013). A tese abrange ainda a teoria de capacidades dinâmicas, uma vez que a capacidade de desenvolvimento do setor fotovoltaico pode ser expressa por habilidades distintas de integração e construção de competências para garantia de vantagem competitiva no mercado (TEECE; PISANO; SHUEN, 1997).

## 5.2 CONTRIBUIÇÕES PRÁTICAS

A energia fotovoltaica é uma fonte renovável, de baixo impacto ambiental e que aproveita a radiação solar disponível para gerar eletricidade. Esse tipo de geração, na modalidade distribuída, tem atraído potenciais investidores, tendo em vista a redução de custos dos componentes dos sistemas FV observada nos últimos anos e o aumento das tarifas de eletricidade em consequência da escassez hídrica que afeta o Brasil em 2021. Esse cenário favorável à difusão dessa fonte de energia renovável, contudo, não elimina os desafios existentes no setor. Sendo assim, esta tese contribui para o fortalecimento da cadeia de valor fotovoltaica brasileira através de informações precisas e detalhadas sobre o segmento e da elaboração de estratégias que podem ajudar os *stakeholders* envolvidos a ampliarem a qualidade e competitividade de seus produtos e serviços.

Os resultados desta pesquisa vão ao encontro do estudo de Heideier et al. (2020), ressaltando que mudanças são necessárias no atual arcabouço regulatório do setor elétrico brasileiro para garantir a sustentabilidade econômica do mercado, como vem sendo observado na minuta de revisão da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL. Além disso, a presente tese contribui para que legisladores e formuladores de políticas tenham conhecimento aprofundado do setor fotovoltaico brasileiro, criem programas públicos para maior adoção FV e aprovem um Marco Legal para Mini e Micro Geração Distribuída no país, fornecendo segurança jurídica, estabilidade e previsibilidade para o mercado com o objetivo de atrair investimentos e reduzir riscos.

Este estudo aponta que a cadeia de valor fotovoltaica brasileira não é competitiva no cenário mundial, uma vez que os custos para produção no país são elevados, o contexto político e econômico é incerto e a tributação sobre os componentes nacionais e importados é desigual. No entanto, ao apresentar uma análise detalhada do setor, esta tese contribui para que *stakeholders* nas cadeias de valor principal e auxiliar se relacionem e estabeleçam estratégias e medidas corretivas para enfrentar as barreiras existentes e criar condições vantajosas para que a indústria nacional opere mais fortemente no mercado interno. Ademais, permite que os diferentes elos visualizem fatores determinantes à sua competitividade e estructurem planos de ação para aprimorar o desenvolvimento dessa indústria emergente. Medidas de fortalecimento da economia nacional são ainda mais importantes no contexto atual de crise energética chinesa,

que tem afetado a cadeia produtiva de diversos segmentos e ocasionado problemas de abastecimento de mercadorias e aumento de preços de equipamentos.

Esta pesquisa disponibiliza informações estratégicas a empreendedores, investidores e governo, visando auxiliá-los na identificação de caminhos e oportunidades para a transição energética no país. A tese apresenta conhecimentos fundamentais para que campanhas educativas e abordagens efetivas de *marketing* sejam realizadas por agentes e empresários do setor, vislumbrando aumentar a conscientização da população sobre essa fonte de energia renovável. Ademais, fornece embasamento para que novos projetos sejam delineados com o objetivo de aumentar a participação da geração distribuída fotovoltaica na matriz elétrica nacional, minimizando a necessidade de utilização de usinas termelétricas em períodos de estiagem ou alta demanda, que acarreta impactos ambientais negativos e tarifas de eletricidade elevadas (RIGO et al., 2019). Estimulando a adoção da geração fotovoltaica, ainda é possível contribuir para o estabelecimento de um mercado sólido e criação de renda e empregos, especialmente importantes para a recuperação econômica brasileira em um cenário pós-pandemia de COVID-19.

### 5.3 LIMITAÇÕES E OPORTUNIDADES PARA FUTURAS PESQUISAS

Embora os resultados alcançados neste estudo tenham atendido aos objetivos propostos, foram identificados alguns fatores que limitaram o seu desenvolvimento. Houve dificuldade em obter respostas dos profissionais convidados a participar dos Artigos 1 e 3 desta pesquisa. Das 627 pessoas contatadas, 99 (15,8%) se disponibilizaram a fornecer informações e auxiliar na compreensão da cadeia de valor da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil. Dessa forma, pesquisas futuras poderiam estabelecer estratégias distintas de abordagem dos *stakeholders* para que um número maior de contatos realizados seja convertido em participação nos estudos, ampliando o entendimento do setor no país.

Adicionalmente, esta tese fornece *insights* para o desenvolvimento de pesquisas aplicadas no campo de gerenciamento de energia fotovoltaica. Assim, trabalhos futuros podem analisar a cadeia de valor do setor em países ou regiões com características geográficas, comportamentais e tecnológicas similares às identificadas no Brasil. Esse tipo de estudo permite a comparação entre os contextos analisados e é útil para que políticas e ações conjuntas de

pesquisa e desenvolvimento sejam estabelecidas visando o aumento da participação da geração fotovoltaica na matriz elétrica mundial.

Verifica-se, ainda, a possibilidade de desenvolvimento de um estudo futuro que avalie o impacto de cada matéria-prima, componente e serviço envolvido na cadeia de valor fotovoltaica no custo final do sistema FV oferecido ao cliente. Essa pesquisa possibilitaria a identificação de elos com maiores custos para produção ou prestação de serviços, auxiliando profissionais do setor na elaboração de planos de ação para que os custos sejam reduzidos e o investimento se torne mais atrativo ao consumidor final.

#### REFERÊNCIAS

- CHEN, Z.; SU, S. I. I. Multiple competing photovoltaic supply chains: Modeling, analyses and policies. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1274–1287, 2018.
- DE SOUZA, L. E. V.; CAVALCANTE, A. M. G. Towards a sociology of energy and globalization: Interconnectedness, capital, and knowledge in the Brazilian solar photovoltaic industry. **Energy Research and Social Science**, v. 21, p. 145–154, 2016.
- DOS SANTOS, L. L. C.; CANHA, L. N.; BERNARDON, D. P. Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. **Renewable Energy**, v. 116, p. 384–401, 2018.
- DUNG, T. Q. et al. Entrepreneurial orientation and vertical knowledge acquisition by smallholder agricultural firms in transitional economies: The role of interfirm collaboration in value-chains. **Journal of Business Research**, v. 137, p. 327-335, 2021.
- FREEMAN, R. E. Divergent stakeholder theory. **The Academy of Management Review**, v. 24, n. 2, p. 233-236, 1999.
- HEIDEIER, R. et al. Impacts of photovoltaic distributed generation and energy efficiency measures on the electricity market of three representative Brazilian distribution utilities. **Energy for Sustainable Development**, v. 54, p. 60–71, 2020.
- LAWRENCE, P. R.; LORSCH, J. W. Differentiation and integration in complex organizations. **Administrative Science Quarterly**, v. 12, n. 1, p. 1-47, 1967.
- LIU, J. et al. Study on coupling optimization model of node enterprises for energy storage-involved photovoltaic value chain in China. **Energy Reports**, v. 6, s. 7, p. 69-81, 2020.
- MASTROCINQUE, E. et al. An AHP-based multi-criteria model for sustainable supply chain

- development in the renewable energy sector. **Expert Systems with Applications**, v. 150, p. 113321, 2020.
- MEDEIROS, J. F.; RIBEIRO, J. L. D.; CORTIMIGLIA, M. N. Success factors for environmentally sustainable product innovation: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 76-86, 2014.
- MORIN, E. **La Méthode: Ethique**. Editions du Seuil, Paris, 2013.
- RIGO, P. D. et al. Is the success of small-scale photovoltaic solar energy generation achievable in Brazil? **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118243, 2019.
- ROSA, C. B. et al. Mathematical modeling for the measurement of the competitiveness index of Brazil south urban sectors for installation of photovoltaic systems. **Energy Policy**, v. 136, p. 111048, 2020.
- TEECE, D. J.; PISANO, G.; SHUEN, A. Dynamic capabilities and strategic management. **Strategic Management Journal**, v. 18, n. 7, p. 590-533, 1997.
- ZHANG, F.; GALLAGHER, K. S. Innovation and technology transfer through global value chains: Evidence from China's PV industry. **Energy Policy**, v. 94, p. 191–203, 2016.